

空間分解した星形成則から探る 銀河の進化

竹内 努^{1,2}・依田 萌¹・
COMINGチーム



竹内



依田

〈¹名古屋大学大学院理学研究科素粒子宇宙物理学専攻銀河進化学研究室 (Ω研) 〒464-8602 愛知県名古屋市中種区不老町〉

〈²統計数理研究所統計的機械学習研究センター 〒190-0014 東京都立川市緑町 10-3〉

e-mail: takeuchi.tsutomu@g.mbox.nagoya-u.ac.jp

銀河中のガスと星形成率の面密度の間には、ケニカット-シュミット則 (K-S則) と呼ばれる対数線型関係が成り立つことが知られている。しかし、これまで精力的に研究されてきたにもかかわらず、未だK-S則は経験則の域を出ていない。これは、主にガス面密度推定に必要な電波撮像観測に時間がかかり、多くの銀河に対して均質なデータを得ることが難しかったためである。我々は、野辺山45 m鏡レガシープロジェクトCOMINGのデータを用い、およそ100天体の近傍銀河に対して1キロパーセクスケールに空間分解したK-S則を検証した。この結果、星形成率面密度と分子ガス面密度はほぼ比例することを確認した。原子ガスには明らかな線型関係は見られず、その結果全ガスでの空間分解したK-S則は星形成に対して非線型な関係となる。本稿では、この問題の背景、最新の解析法、そして結果が銀河進化に与える示唆について解説する。

1. はじめに

銀河とは、星と星間物質 (ガスとダスト^{*1})、そして暗黒物質で構成される巨大な天体であり、我々の住む天の川銀河もそのひとつである。現在観測できる宇宙の範囲に、銀河は数千億個も存在している。これほど巨大で、これほどありふれた存在である銀河だが、それらは宇宙にはじめから存在していたのではない。きわめて一様な分布をしていた暗黒物質のかすかな密度のゆらぎが重力によって増幅され、その後通常物質^{*2}が引き

寄せられることで誕生した。その後、銀河の中ではガスから星が形成され、また時には他の銀河と合体して成長し、現在の姿に進化してきたのである。このように、星形成は銀河の進化の中心をなす本質的に重要な物理過程である。

銀河の中のガスにはさまざまな存在形態がある。高温の成分は電離し、密度の低いプラズマとなっている。比較的低温の成分は少し密度が高く中性水素 (HI) が主体の原子ガス、そして非常に低温の成分は水素原子が2個結合した水素分子が主体の高密度の分子ガスとして存在する。そし

^{*1} 重元素からなる固体微粒子で、典型的な粒子サイズは $\sim 0.1 \mu\text{m}$ 程度である。焚火の煙も同様の微粒子だが、サイズが $\sim 1 \mu\text{m}$ と少し大きい。よって銀河のダストは粒子の小さな煙と考えるとよく、実際古い文献ではスモークと呼ばれていた。

^{*2} どういうわけか、宇宙物理学ではバリオンと呼ばれる。しかも素粒子物理学での元の意味とは異なり、大雑把には我々になじみのある物質という意味で用いられる。

て、星の誕生にはガスが高密度になることが必要条件であるため、星形成は分子雲の中で生じる。すなわち、ガスから星への転化は

原子ガス \Rightarrow 分子ガス \Rightarrow 星

という道筋をたどる。この過程は数パーセクから数天文単位にわたるスケールで生じる。銀河は数キロパーセクから数十キロパーセクの広がりを持つ天体であり、星形成過程は銀河と比べて非常に空間的なスケールが小さい。にもかかわらず、銀河の形態や環境といった巨大なスケールの現象と銀河の星形成率の間には興味深い相関が多々発見されている。そして、そのほとんどが理論的説明が十分にされていないままの経験則にとどまっているという、研究上なんとももどかしい状況である。星形成というキーワードのもと、銀河のスケールから見た「ミクロ」と「マクロ」をつなぐミッシングリンクを解明することは、銀河進化の完全な理解へ向けて重要なステップとなる。本稿では、そのような試みのひとつとして、銀河のガス面密度と星形成率面密度の関係に注目し、我々の最近の研究成果を紹介する。

2. 銀河の星形成とケニカット-シュミット則

2.1 銀河の星形成

銀河研究者から見た星形成の描像からはじめよう。銀河の中にあるガスはさまざまな原因によって冷えて濃くなっていく。温度が下がると、ガスはプラズマから通常の原子になり、そして分子が形成される^{*3}。宇宙の中で圧倒的に大量に存在する物質は水素であるため、こうしてできた分子の塊（分子雲）もほぼ水素分子からなる。そして水素分子は形成される一方ではなく、周囲から放射される紫外線によって解離して原子に戻る。水素

分子の形成と解離がちょうどつりあうところが分子雲の境界を形作っている。つまり、この境界よりも中には紫外線は入れない。このことによって分子雲の中はさらに冷えることができ、最終的に非常に高密度の分子雲コアを形成する。星はこの中で形成されるのである。

2.2 ケニカット-シュミット則

このことから、星の形成効率率はガスの密度に関係しそうだと考えるのが自然である。今を遡ること60年、1959年にシュミットは星形成率がガスの体積密度 ρ の n 乗に比例する、つまり

$$\text{星形成率} \propto \rho^n \quad (1)$$

という説を提唱した[1]。星形成率とは、1年当たりに太陽質量を単位としてどのくらいの質量の星が作られているかを示す物理量で、銀河進化の研究では中心的な役割を果たす。このべき指数 n が1に近ければ、物質の濃さに応じた量の星が作られるという単純な描像を示唆する。一方たとえば n が2に近ければ、密度の2乗に関係する、つまり分子雲同士の衝突のような現象が星形成を支配している可能性がある。つまり、星形成をトリガーする機構に関係する物理量として、べき指数 n は重要な意味を持っている。

しかし、当時は観測自体も難しく、また星形成率の導出法も未発達であったため、この研究が大きく進展するのは実に30年後、1989年のケニカットの論文を待たなくてはならなかった[2]。ケニカットは近傍銀河の一酸化炭素(CO)観測と中性水素21 cm輝線、水素の電離再結合線の観測から、分子ガスの面密度と星形成率の面密度の間に6桁以上にわたる対数線型関係が成り立っていることを示した。この論文では観測の不定性が大きく、指数の推定誤差も非常に大きかったが、1998年に彼が出版した改訂版では、観測データ

^{*3} 正確には、銀河の中では、原子同士が衝突して結合して分子を形成するのではなく、ダスト粒子表面が触媒となって分子ができる反応が圧倒的に効率が高い。

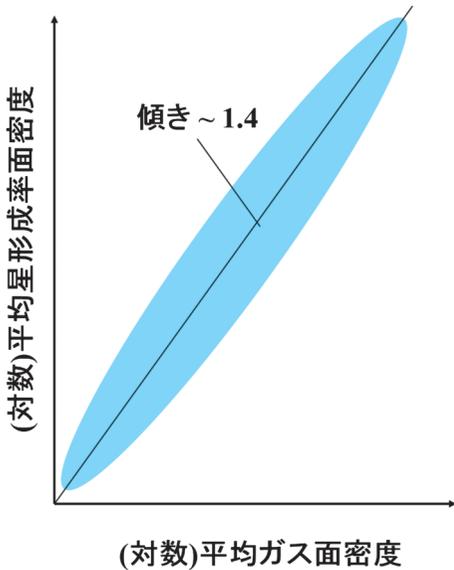


図1 銀河全体で平均した値で見たケニカット-シュミット (K-S) 則の模式図。両対数目盛で直線的な関係であり、傾きは1.4程度と見積もられている。

が量、質ともに大きく向上し、この指数はほぼ $n=1.4$ であることが示された [3]。この2人の研究者の貢献に因んで、この経験則はケニカット-シュミット (K-S) 則あるいはシュミット-ケニカット則と呼ばれている。K-S則の模式図を図1に示す。

2.3 経験則から物理へ：空間分解した K-S 則

これまで見てきたように、K-S則はガスから星への物理過程の結果であると考えられ、非常に重要な意味を持っている。K-S則の確立以降、2000年代初頭にかけて理論サイドから多くのモデルが提唱された。特に、べき指数 $n=1.4$ は冒頭で述べた1と2のちょうど中間の値であり、多くの理論家がこれを説明しようと試みた。たとえばナイーブに、ガスの自由落下時間が $1/\sqrt{G\rho}$ に比例

すること関連づければ指数 $n=1.5$ を「導く」ことができる*4。これ以外にも多くのシナリオが提示され、中にはK-S則を解明したという主張も聞かれることがある。さて、では我々はもうK-S則、つまりガスから星への物理を手に行っているのだろうか？

矛盾するようだが、K-S則のべき指数のみをいくらか考察しても背後にある物理過程は特定できない。星形成は多くの素過程が積み重なった結果生じる現象であり、オリジナルのK-S則のみでは情報量が絶対的に足りないのである。これはケニカットがこの分野の総説論文 [4] で明示的に強調している点であり、彼らは勇み足の議論に対して警鐘を鳴らしている。

K-S則を物理的に理解するために観測サイドから解決すべき重要な問題点がいくつかある。ここでは銀河を空間分解することで見えてくるK-S則の新たな側面に注目する。2000年代前半まで、K-S則といえば銀河全体で積分した量を面積で割って得られた面密度を用いた議論に限られていた。つまり、この「古典的」K-S則という面密度とは、銀河全体で均された平均量である。繰り返し強調するが、銀河のスケールは星形成の関連するスケールよりもるかに大きいので、平均量を用いたK-S則の議論は銀河の大局的物理量との関係を見るには適切である。これに加えて銀河の内部構造を空間分解することで得られる新たな情報は、大局的物理と局所的物理、冒頭で述べたマクロとミクロの物理をつなぐ手がかりとなると期待される。それはさまざまな銀河内環境での星形成を反映しているはずである。

K-S則を空間分解する研究にもいくつかの方向が考えられる。銀河をどんどん小スケールに分解する試みについては2013年の天文月報に分かり

*4 これはその明快さが好まれており、教科書にも紹介されることもあるシナリオだが、本文で述べたように銀河のスケールと星形成のスケールの間には何桁もの開きがあり、銀河全体を代表するガス密度と実際の星形成との意味のある関連づけができないため、過度の単純化であると考えられる。

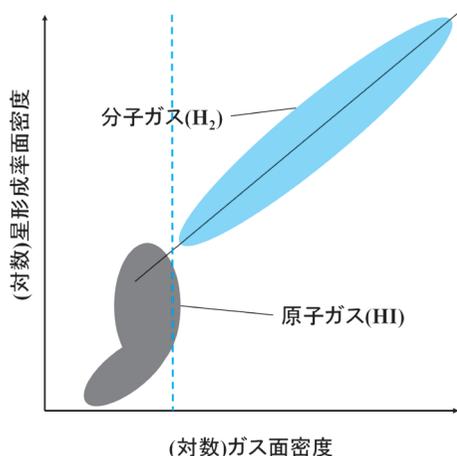


図2 空間分解された銀河のK-S則の模式図。点線は原子ガスから分子ガスへの転換の閾値を示す。

やすい記事があるので [5], ここでは少し異なった切り口でこの問題を検証していこう。2008年, ビギエルらは近傍銀河18個について紫外線 (1530 Å), 赤外線 (24 μm), 中性水素, CO分子の多波長画像データを構築し, 750パーセクのスケールに分解したK-S則を求めた [6]. その結果の特筆すべき点は, 原子ガスと分子ガスに分けて描いたK-S則である。原子ガスは星形成率と目立った相関を持たず, 単一べきとはいいがたい分布を示した。対照的に, 分子ガスは星形成率とよく相関し, そのべき n はほぼ1であることが見いだされたのである。図2に空間分解したK-S則の模式図を示す。

ビギエルらの結果は非常に印象的であり, 驚きを持って迎えられた。星形成には閾値があり, 原子ガスは星形成とあまり物理的に関連していないのに対し, 分子ができる密度の閾値を超えた場所では星が形成される, ということになる。このシナリオが与えたインパクトは観測的研究にとどまらず, 数値シミュレーションにも影響を与えている。

この示唆するところは単純で分かりやすい描像だが, いくつか気になる点が残っている。まず, 銀河の数は18個と, 決して多くはない。銀河は

その形態をはじめ, 個々が非常に個性的な特徴を持っている。サンプル数18という数はその一般論を導くのに十分とはいえない。そして, 彼らの論文を批判的に精読すると, 実は図2のような特徴を示さない銀河もそこそこあることが分かる。果たして, 18個のサンプルのさらに部分集合にしか当てはまらない描像を一般的結論としても問題はないのだろうか? そして, その後の研究で報告されているべき指数も論文によってかなりのばらつきがある。実は, これまであまり重視されてこなかったが, べき指数を求める統計的方法も慎重に選ばなくてはならない [7]. 同じ図でも統計的方法が違えば異なった指数が得られるため, 時としてまったく無意味な比較をしている論文も見られる。この二つの意味で, 十分な統計的議論のできるサンプルによる, 信頼できるデータ解析を用いた追検証が急務であった。

3. COMING サンプルによる空間分解された銀河のK-S則の検証

我々はビギエルらの研究を踏まえ, 大サンプルでの空間分解したK-S則の検証と銀河の大局的性質との関連を探るための研究を行った。K-S則の研究で鍵となるのがガスの観測である。原子ガス, 分子ガスともに電波望遠鏡による観測が主体となるが, どちらも一般に観測コストが高く, 系統的に多くの銀河のデータを得ることはこれまで難しかった。特にCOの観測は装置の視野が小さく, また素子数も少ないためマッピング観測は非常に時間がかかるのが常であった。本研究では, 野辺山45 m電波望遠鏡のレガシープロジェクトCOMINGによって得られた最新のデータを用いた。本稿では, このサンプルに紫外, 赤外, 長波長電波の観測を加え, 空間分解したK-S則の精密検証を行った結果について解説する。

3.1 原子ガス・分子ガス

原子ガスおよび分子ガスの量は電波観測によって求める。原子ガスは, 水素原子中の電子のスピ

ンの向きが変化することで生じるエネルギーに対応する、波長約21 cmの電波を用いて観測するのが一般的である。分子ガスはCO輝線の観測量に、CO積分強度とH₂分子の面密度の換算係数をかけて全H₂分子の量を求める。どちらも量子力学を用いて理論的に計算できる。電波観測で得られる観測量は奥行き方向の空間情報を失っているので、分子および原子ガス密度も空間密度ではなく面密度に換算するほうが余分な仮定が不要な分素直である。他の波長での観測も状況はだいたい同じであり、面密度のほうが求めやすい。これが、ケニカットのK-S則がシュミットが最初に提唱した体積密度ではなく、面密度で記述されている主な理由である。

3.1.1 COデータ: COMING

我々はCO輝線の観測として、2014–2017期野辺山観測所レガシープロジェクトに採択されたCO Multi-line Imaging of Nearby Galaxies (COMING) の¹²CO(1-0)のデータを用いた。COMINGプロジェクトは野辺山45 m電波望遠鏡を用いてCO輝線¹²CO(1-0)、¹³CO(1-0)、C¹⁸O(1-0)のマッピング観測を147天体に対して行った。COMINGの空間分解能は17″、速度分解能は10 km s⁻¹である。全ての銀河について、1″平方あたりの表面輝度がBバンドで25等になる直径D₂₅の70%が観測されている。このD₂₅は星が決める銀河のサイズを表す量であり、COMINGではその大部分がカバーされていることを意味する。本研究ではCOMINGプロジェクトが公開している積分強度図と積分強度誤差マップを使用した。COMINGの詳細については本号の徂徠和夫さんの記事および出版論文[8]をご参照されたい。

なぜCO輝線を用いるか疑問に思う読者も多いだろう。同種原子の2原子分子である水素分子は永久電気双極子モーメントを持たず、電気双極子

回転遷移は強く禁止されている。加えて、電気四重極子回転遷移による輝線は分子雲のような低環境ではほとんど放射を出さない。簡単にいうと、水素分子は電波で光らないのである。このような理由から一般に水素分子ガス質量は、回転遷移輝線を放射する他の分子の観測から推定される。輝線強度が強く、観測の容易なCOが水素分子ガストレーサーとして使われることが多い。CO分子が化学的に安定で、豊富に存在するためである。CO輝線の強度から水素分子の柱密度への変換係数をCO-to-H₂換算係数X_{CO}という。X_{CO}は観測的に求められている太陽近傍の値を用いることが多く、本研究もこれに倣った*5。

3.1.2 原子ガス (H I) データ: VLA

水素原子ガス密度推定のため、Very Large Array (VLA または JVL) で観測された21 cm輝線データを使用した。VLAは27台のアンテナがY字に配置された米国の電波干渉計である。観測周波数は74メガヘルツから50ギガヘルツで、本研究で用いた21 cm輝線はLバンドと呼ばれる周波数帯で観測されている。本研究では、the H I Nearby Galaxy Survey (THINGS) [9] プロジェクトで公開されている積分強度図と、VLAのアーカイブデータから作成した積分強度図を用いた。

水素原子を構成する陽子と電子は共にスピン $s = 1/2$ を持っている。水素原子のスピン遷移を示したのが図3である。左の状態のようにスピンの向きが同じ方向を向いているときにはエネルギーが高

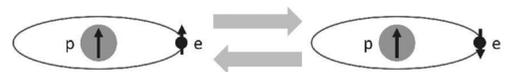


図3 水素原子の電子スピン遷移。陽子が p 、電子が e 、それぞれのスピンの向きが矢印で示されている。左の状態から右の状態に遷移するときには波長21 cmに対応する線スペクトルが放射される。

*5 実はこの換算係数の決定は星間物理から銀河物理における最大の不定性のひとつとして知られる難問であるが、それ自体非常に深い問題であるため本稿では深入りしない。

く、右の状態のように反対方向を向いているときにはエネルギーが低い。スピンの同じ方向から反対方向に遷移するときにエネルギー差 $\Delta E = h\nu$ に対応する輝線スペクトルが放射される。ここで h はプランク定数で、振動数 ν は1.42ギガヘルツすなわち波長 $\lambda = 21.1$ cmに対応している。

3.2 星形成率

3.2.1 星形成率の観測的推定

K-S則研究のもうひとつの観測的支柱が星形成率の推定である。星は集団で形成され、質量の大きな星、小さな星が同時に誕生する。このうち大質量の星は温度が高く（～数万K）、水素原子を電離する紫外線を放射する。電離した水素原子はすぐに電子と原子核が再結合し、電子が持つ余剰分のエネルギーは水素原子固有のさまざまなエネルギー準位の間を遷移する過程（カスケード）で輝線となって放射される。これは電離再結合線と呼ばれる重要な観測量である。この過程も電波での輝線と同じく量子力学で理論的に記述でき、再結合線の明るさからは銀河内の電離光子の単位時間当たりの放射数（数光度）に換算できる。銀河の星形成の研究では、特に可視光線で観測が容易なH α 線（波長6563Å）がよく用いられる。ケニカットの論文でも電離水素領域起源のH α 線によって推定した星形成率が使われているが、ひとつ厄介な問題がある。

冒頭で述べたように、星形成領域はダストと密接なかかわりがあり、現在の銀河の星形成領域には必ず大量のダストが存在している。ダストは紫外線や可視光線を散乱吸収（あわせて減光と呼ぶ）し、吸収したエネルギーを波長約20–200 μ mの赤外線で再放射する。このため、紫外から可視の波長の観測量はほぼ間違いなくダストによる減光によって暗くなっている。水素のH α 輝線も例外ではなく、一般に比較的強いダスト減光を受けている。ケニカットは初期の研究ではダスト減光の性質を仮定し、減光されたエネルギーを補正することで正しい星形成率を推定することを試み

た。しかし、この「補正」はその後一筋縄ではないことが認識され、現在は信頼できる方法とは見なさない研究者も多い。

では、より信頼できる星形成率指標としてどのようなものを考えればよいだろうか。ダストがない仮想的状況では、紫外線光度から大質量星の数に換算できるはずが、現実的にはその一部がダストに吸収され、エネルギー保存則によって赤外線で再放射されている。そこで、筆者やケニカットらは紫外線と赤外線を組み合わせ、直接見える星形成とダストで隠れた星形成とを合計した指標

$$\begin{aligned} \text{星形成率} &= \text{直接見える星形成率} \\ &+ \text{ダストで隠れた星形成率} \\ &= (\text{紫外線の係数}) \times \text{紫外線光度} \\ &+ (\text{赤外線の係数}) \times \text{赤外線光度} \end{aligned} \quad (2)$$

を提案した [10, 11]。紫外線から求められる星形成率は紫外線そのものの強度を使うこともでき、また電離光子から生成されたH α 輝線強度から換算することもできる。現在では、このようなハイブリッド星形成指標を用いるのが標準的となっている。本研究では、カーサソーラらによる、空間分解した銀河のために最適化した指標を採用した [12]。この指標は単位面積あたりの量で定義され、銀河円盤の傾きも考慮されている。

3.2.2 GALEX

紫外線で直接観測できる星形成率の指標として、本研究では非電離紫外線を用いた。この波長の紫外線は大気圏を透過できないため、天文衛星による観測が必要である。紫外線天文衛星GAL-EX (*Galaxy Evolution Explorer*) は遠紫外 (FUV) バンドと近紫外 (NUV) の2バンドで全天の80%以上を撮像観測し、一部の天体では分光観測も行った。本研究では、直近の星形成史と直接関係しない白色矮星からの紫外線の混入がないGAL-EX FUVバンドでの銀河の放射強度を用いた。FUVは波長1344–1786Åに感度を持ち、中心波

長は1538Åである。中心波長における分解能に相当する半値全幅 (FWHM) は4."2である。

3.2.3 WISE

ダストに隠された星形成率の指標はダストからの中間赤外線放射を用いた。隠された星形成のエネルギーは中間赤外線から遠赤外線にわたる非常に幅広い波長域で放射されるため、赤外線の多波長観測でスペクトルエネルギー分布を決定し、それを積分して求めるのが理想である。しかし、赤外線も大気を透過しないため、やはり天文衛星が必要である。特に、赤外線を観測するためには望遠鏡を極低温まで冷却する必要があるため観測は非常に難しく、赤外線探査を広い天域で行うことは容易ではない。また、望遠鏡を大型化するのも技術的に難しいため、角分解能も他の波長に比べて一般にかなり悪い。唯一 *Herschel* 宇宙望遠鏡のデータが理想的だが、観測されている銀河数が限られるため、中間赤外線を用いるしかないのが現状である。本研究では赤外線データとして WISE (*Wide-field Infrared Survey Explorer*) の22 μm バンドの撮像データを使用した。WISEは3.4, 4.6, 12, 22 μm の4バンドで全天の撮像探査を行った探査型赤外線天文衛星である。WISEの22 μmでのFWHMは16."8である。

3.3 サンプル

COMINGで観測された銀河のうち、

- ・ GALEX FUVと WISEのデータがある
- ・ 相互作用していない

という2条件を満たす天体を本研究のサンプルとした。銀河円盤の傾斜角や距離では制限していない。これを満たす銀河数は106個であった。106天体のうち、Hiで観測されており、かつ十分に分解されている42天体では、原子ガスや水素ガス (原子+分子) のK-S則について検証した。

観測データの分解能は望遠鏡や観測波長によって異なる。分解能の異なるデータを直接比較することはできないため、多波長データを扱う場合には全てのデータの分解能を最も分解能の低いデー

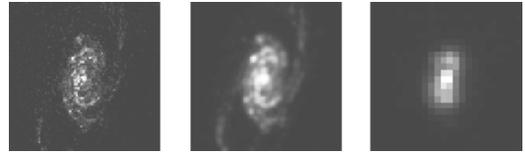


図4 銀河画像の分解能およびピクセル化の流れ。NGC2903のGALEX FUVの元画像 (左) に2次元ガウス分布を畳み込んでCOMINGの分解能に揃え (中央)、1キロパーセクに対応するグリッドで再ピクセル化する (右)。

タに合わせる必要がある。ここで選んだ銀河の画像データを2次元ガウス分布で畳み込み積分することで角分解能を揃えた。これをさらに空間スケール1キロパーセクに相当するグリッドでピクセル化しなおしたデータを用い、空間分解したK-S則を求めた。画像処理の例を図4に示す。

3.4 パラメータ推定

こうして準備した銀河の多波長画像データだが、銀河の明るさが非常に暗い部分では信号に対して雑音が卓越してしまっている。また、電波観測データでは背景のうねりの除去が必要だが、これが必ずしもうまくいかない場合も少なくない。データに線型関数をフィットする方法として、初等的な教科書には必ず最小二乗法が紹介されている。しかし、最小二乗法を持つ本質の問題点として、雑音が大きくなればなるほど「真の」傾きよりも小さな (フラットな) 傾きが推定値として得られるという性質がある [13]。これは意外と知られていないが、最小二乗法を用いる限り絶対に避けられない。統計学ではこの問題は長く研究されており、また限定された問題については天文学者が考案した古典的な相関と回帰の方法を改良したフィッティング方法がいくつか知られている。しかし、そのどれもが一長一短であり、また「真の」傾きを表現していると明確な根拠を持って主張することは難しい。

さらに、空間分解したK-S則では原子ガス、分子ガスで従う関係が明らかに異なり、それぞれに固有の雑音に乗った形で図上でも別の成分として

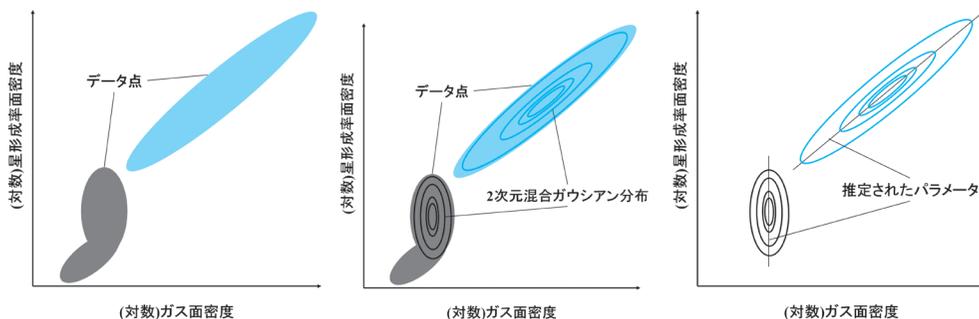


図5 空間分解された銀河のK-S則に混合ガウシアンモデルを適用した概念図. 異なった成分に別の2次元ガウシアンがフィットされ、相関関係の傾きはガウシアンを決める相関行列として一意に定まる.

現れることを見た. このようにデータに素性の異なるいくつもの成分が存在する場合、客観的方法でその相関関係を特定し、傾きを求める問題は従来の方法では非常に困難である. そこで我々は、この問題に明快な解答を与えることのできる方法である、混合ガウシアンモデルを用いたEM (expectation-maximization: 期待値最大化) アルゴリズムによるパラメータ推定を行った. 混合ガウシアンモデルとは、文字通りデータが複数のガウス分布の和から抽出されたと仮定するモデルであり、明らかに多峰型のヒストグラムが得られている場合や今回のK-S則のように多成分が見えているデータ分布のモデルとしてよく用いられる.

EMアルゴリズムは1977年にデンプスター、レード、ルービンによって導入された [14]. これは反復型のアルゴリズムで、あるひとつのデータ点がどのガウス分布に所属するかを各ステップで判定し、最終的に尤度が最大になる解を決定する. EMアルゴリズムによる混合ガウシアンモデルの決定は広い意味で機械学習の一分野と見なされることもあり、現在ではさまざまなデータ解析で広く用いられている. Pythonなどで公開コードも整備されていることも非常に便利な長所である. この方法では異なった成分にそれぞれの2次元ガウス分布がフィットされ、相関関係の傾きはガウス分布のパラメータ (相関行列の成分) としてあいまいさなく一意に定まる. また背景成分の

ノイズの寄与も分離でき、傾きの推定への悪影響も取り除くことができる. さらに、2次元ガウス分布をフィットするため、パラメータ推定と検定が同時に行えるという実践的な利点もあり、この種の問題にとって実に理想的な方法である.

我々はこの方法をK-S則の線型関係推定に適用した. 解析の流れを図5に示す. ノイズを含むデータ点が、複数の2次元ガウス分布の和から生じたと考え、各ガウス分布のパラメータが決定される. このパラメータがK-S則の傾きに対応する. これにより、先行研究で頻繁に見られた方法論の違いに起因する非本質的な、混乱した議論が回避できる.

4. 結果と考察

このように準備した観測データ、星形成指標、そしてデータ解析法を用い、空間分解したK-S則を検証した結果とそこから得られる銀河進化への示唆について紹介する. 本研究はCOMINGサンプルから出発しているため、分子ガスでのK-S則の性質が最も詳しく解析できており、議論も分子ガスに重点を置いている.

4.1 分子ガスのK-S則

まず、解析結果の例としてNGC5678の分子ガスでのK-S則を図6に示した. この図では分子ガスのK-S則を対数で

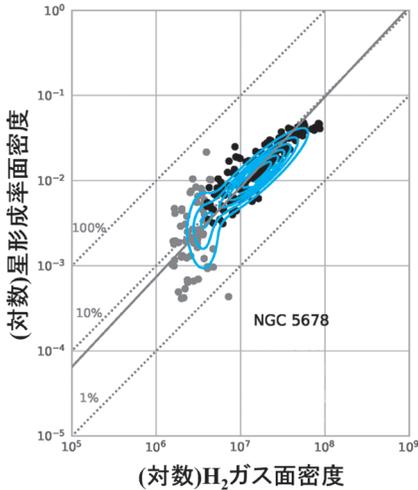


図6 COMING サンプルで得られた、空間分解した分子のK-S則の1例(NGC5678).

$$\log \Sigma_{\text{SFR}} = A + N \log \Sigma_{\text{H}_2} \quad (3)$$

と表し、係数 A と N を統計的に推定した。 Σ_{SFR} が星形成率面密度、 Σ_{H_2} が水素分子面密度である。図中でシンボル・ \bullet がデータ点(雑音含む)を表し、黒のシンボルがEMアルゴリズムによって物理的に意味のあるデータ点、灰色が雑音が支配的で物理的線型関係を決定するのに用いられないと判定されたデータ点である。推定された2次元ガウス分布の和をコントアで示している。この図は分子ガスのみのK-S則を示しているが、電波画像のデータ処理の困難に起因する雑音が強く混入し、明らかに線型関係と無関係な点があることが分かる。ビギエルらもこの問題は認識しており、このような点の影響を避けるため、天文分野で考案されたアドホックな統計的方法を用いた*6。ビギエルらのフィットの結果は図中の灰色の実線で示した。彼らの方法でも物理的相関に近い結果は得られているが、ノイズに引きずられて傾きが少し急になっている。これに比べ、本研究でのフィット

結果では雑音の悪影響を分離し、物理的な関係を正確に推定できている。いうまでもなく、全ての銀河についてこのようにうまく雑音分離できるわけではなく難しい例もあるが*7、先行研究に比べ非常に安定した結果が得られた。

全サンプル中、101個の銀河について空間分解した分子ガスK-S則が得られた平均パラメータは $N = 0.93 \pm 0.02$, $A = -8.3 \pm 0.2$ となった。若干 $N = 1$ より小さいが、かなり1に近い値が得られている。星形成のシナリオとしては、星形成率が分子ガス密度に比例するという非常にシンプルな描像が示唆されていることになる。

ガスから星への過程を議論するときによく用いられるのが星形成効率(star formation efficiency: SFE)

$$\text{SFE}_{\text{mol}} = \frac{\text{SFR}}{M_{\text{mol}}} \quad (4)$$

という物理量である。ここで下付き添字 mol は分子ガスに関連する量であることを表し、 M_{mol} は分子ガス質量である。分子ガスについて星形成効率 SFE_{mol} を見てみると、その平均値 $\langle \text{SFE}_{\text{mol}} \rangle$ は $\sim 10^{-9}$ となっている。SFEの逆数がガス消費時間を表し、これが $\sim 10^9$ 年であることを示している。K-S則の傾きがほぼ1であることから、分子ガス消費時間は2桁以上の広い質量範囲にわたりこの値で一定であることになる。

4.2 原子ガス、全水素ガスのK-S則

本サンプルのうち、原子ガスのデータが得られている41個の銀河については、原子ガスを含むK-S則についても検証した。図7に結果を示す。原子ガスのK-S則(図7の左パネル)を見ると、原子ガスは $\Sigma_{\text{HI}} \sim 10^7 M_{\odot} \text{ kpc}^{-2}$ で飽和している、つまりこれ以上の密度にならないことが分かる。原子ガスK-S則には星形成率とゆるく相関する成分と、ほぼ無相関で飽和密度付近に分布する成分

*6 名前だけの紹介にとどめるが、OLSバイセクターフィッティングと呼ばれている。

*7 たとえばサンプル中3個の銀河では、全てのデータ点が雑音であると判定されている。

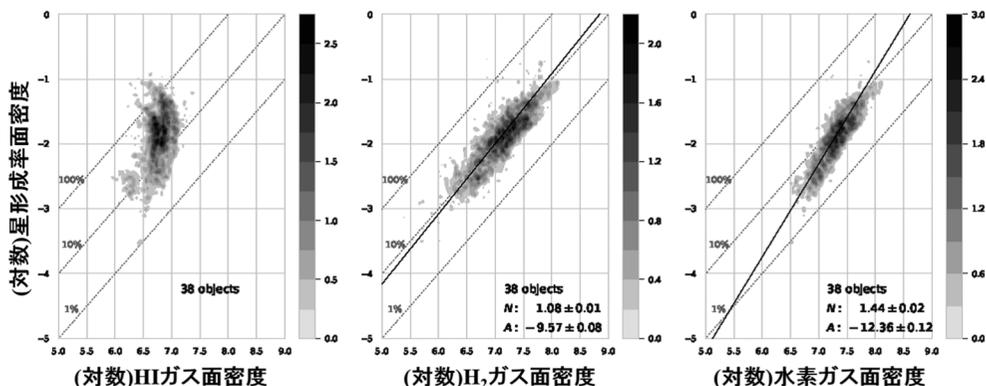


図7 COMING サンプルで得られた空間分解したK-S則を全ての銀河について示した図。原子ガス(左), 分子ガス(中央), 全水素ガス(右)をそれぞれ示している。斜めの点線は星形成効率が一定のときのガス面密度と星形成率面密度の関係である。下からそれぞれ1, 10, 100%のガスが 10^8 年で消費される星形成効率を示す。ガスの消費時間に換算すると, 上から $10^8, 10^9, 10^{10}$ 年である。

があるが, 角分解能が影響している可能性も残る。飽和面密度は常に一定ではなく, 脚注^{*3}で述べたようにダスト量を通じて重元素量に依存する。近年ではこの問題に対する観測的研究も注目されてきている [15]。本研究の方法を用いてこの問題を追求することも原理的には可能であるが, やはり分解能のよい原子ガス画像があれば理想的であり, この意味でも今後のデータの改善が待たれる。

原子と分子を合計した全水素ガスのK-S則(図7の右パネル)は, ゆるく上に凸になった非線型性を示す。右上に伸びるデータ点が分子ガスが卓越している領域, 左下に急な傾きで落ちていくデータ点が原子ガスが卓越している領域に対応している。この非線型性は銀河全体について平均したグローバルなK-S則では分散に埋もれてしまい, 見えなかった特徴である。また, これは線型関数の係数がフィットの方法によって大きく異なる原因でもある。単一の線形関数を従来の方法でフィットした結果はグローバルなK-S則と非常に近いべき指数となり, これがグローバルなK-S則のべきを決めていると見てよい。しかし, ここまで見てきたように, 全水素ガスのK-S則はまったく振舞の違う二つ以上の成分からなる複雑な関係

であり, このべき指数から物理過程を特定する議論にはつながらないことが分かる。

5. 結 論

我々はCOMINGによる銀河のCO画像を出発点とし, 原子ガスにVLA, 紫外線にGALEX, 赤外線にWISEの画像を用いて1キロパーセクに空間分解した分子ガスK-S則を検証した。

星形成率面密度は分子ガス面密度にほぼ比例しているという結果が得られ, 星形成率が分子ガス密度に比例することが分かった。これは, 星形成によって分子ガスが消費される時間がガス密度2桁以上の広い範囲にわたり $\sim 10^9$ 年という一定値を取ることを示している。この関係が多くの銀河で見られるということは, ガスから星への物理過程が1キロパーセク以下のスケールで決まっており, 素過程は銀河のグローバルな個性によらないことを意味する。

一方原子ガスのK-S則では原子ガスがある閾値密度で飽和していることが示された。理論的には飽和面密度はダスト量経由で重元素量に依存すると考えられ, 今後は観測的に重元素量との関係を検証することが課題となる。このためには分解能のよい原子ガス画像が必要だが, 飽和密度を含む

議論は銀河の重元素量の時間進化、すなわち化学進化と呼ばれる銀河進化学理論の基本と結びつけることができ、この方向の研究が進めば銀河進化の定式化に向けて大きく前進すると期待できる。

原子と分子を合計した全水素ガスのK-S則は、両対数で非線型性を示す。これがグローバルなK-S則の冪を決めているが、この非線型性は原子、分子ガスという異なった成分があることから生じた複合的現象であり、このべき指数から物理過程は特定できないことも明らかになった。

本稿は依田の2018年度修士論文での研究の一部が元になっている。ここで紹介しなかった検証も含めた結果はTakeuchi, Yoda et al. として論文投稿予定である。

謝 辞

本研究では、カリフォルニア工科大学ジェット推進研究所が運用するNASA/IPAC Extragalactic Database (NED) を利用した。本研究は科研費(17H01110, 19H05076)、住友財団自然科学研究助成(180923)、統計数理研究所共同利用(一般研究2: データ科学的方法による銀河進化研究の新展開)の援助を受けて行った。

参 考 文 献

- [1] Schmidt, M., 1959, ApJ, 129, 243
- [2] Kennicutt, R. C., Jr., 1989, ApJ, 344, 685
- [3] Kennicutt, R. C., Jr., 1998, ApJ, 498, 541
- [4] Kennicutt, R. C., Jr., & Evans, N. J., 2012, ARA&A, 50, 531
- [5] 小麥真也, 2013, 天文月報, 106, 28
- [6] Bigiel, F., et al., 2008, AJ, 136, 2846
- [7] Rahmani, S., et al., 2016, MNRAS, 456, 4128
- [8] Sorai, K., et al., 2019, PASJ, 71, S14
- [9] <http://www.mpia.de/THINGS/Data.html> (2020.4.27)
- [10] Takeuchi, T. T., et al., 2010, A&A, 514, A4
- [11] Kennicutt, R. C., et al., 2009, ApJ, 703, 1672
- [12] Casasola, V., et al., 2017, A&A, 605, A18
- [13] たとえばホーエル, P. G., (浅井晃, 村上正康訳), 1978, 入門数理統計学 (倍風館)
- [14] Dempster, A. P., et al., 1977, Journal of the Royal Statistical Society: Series B, 39, 1
- [15] Schrubba, A., et al., 2018, ApJ, 862, 110

Spatially Resolved Kennicutt–Schmidt Law and the Implication to the Galaxy Evolution

Tsutomu T. TAKEUCHI, Moe YODA and COMING Team

¹ Laboratory of Galaxy Evolution (Ω Lab), Division of Particle and Astrophysical Science, Nagoya, Aichi University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8602, Japan

² The Research Center for Statistical Machine Learning, the Institute of Statistical Mathematics, 10-3 Midori-cho, Tachikawa, Tokyo 190-8562, Japan

Abstract: A log-linear relation between gas and star formation rate (SFR) surface densities in galaxies is known as Kennicutt–Schmidt (K-S law). Though the K-S law has been studied extensively, it still remains as a heuristic law. This is mainly because it takes much time for a radio imaging, which is necessary for the estimation of gas surface densities, and then it is difficult to obtain homogeneous dataset for many galaxies. We examined the K-S law resolved to 1 kpc scale for about 100 nearby galaxies by using the data of COMING, a Nobeyama Radio Observatory 45 m Legacy Project. Then, we confirmed that the SFR surface density is approximately proportional to that of the molecular gas. In contrast, the SFR does not have a significant log-linear relation to the atomic gas, leading to a non-linear relation as the K-S law for total gas in logarithmic scale. Here, we introduce the scientific background of this topic, state-of-the-art data analysis, and obtained suggestions to the evolution of galaxies.