

星形成銀河を司る四大要素

橋本 哲也¹
後藤 友嗣²
百瀬 莉恵子³



橋本



後藤



百瀬

〈国立清華大学（台湾）101, Section 2, Kuang-Fu Road, Hsinchu 30013, Taiwan〉

e-mail: ¹tetsuya@phys.nthu.edu.tw, ²tomo@phys.nthu.edu.tw, ³momose@astron.s.u-tokyo.ac.jp

星形成銀河には「星質量」「重元素量」「星形成率」の三つの要素の間に最も基本的な観測的關係があるとされています。ところがこの三者の關係の周りには依然として観測エラーを超えるデータのばらつきがあります。このことから第四の観測的要素によって観測エラーを超えるばらつきが生じているという事が示唆されます。そこで筆者らは可視光大規模サーベイ観測データと主成分分析を駆使して、数多の観測要素から最も重要な四つの要素を発見しました。実際に第四の要素を取り入れることでデータのばらつきが観測エラーと同等のレベルにまで小さくなることがわかりました。四つの要素が作る新しい観測的關係は星形成銀河についてのこれまでの理解をより深めるきっかけになると期待しています。

1. はじめに

はるか昔、紀元前400年頃のヨーロッパでは、世界の物質は四つの要素からできていると考えられていたそうです。火、水、空気、土からなる、いわゆる「四大元素」のアイデアはその後、現代科学の基礎である「元素」や「原子」の概念へと受け継がれています。この「四大元素」は今でこそ改められていますが、現代化学や物理学の出発点と言っても過言ではないでしょう。実は今、星形成銀河研究においてもこの種の「四大要素」が盛んに議論されるようになってきました。星形成銀河における「四大要素」とは何なのでしょうか。

2. 発端

天文学者は最新の研究結果を逃さずキャッチするように努めています。「Astro-ph」には最新の投稿、受理された論文が日々大量に集まってきま

す。その中から興味深い論文をピックアップして他の天文学者と情報共有するようなゼミがどの大学や研究機関にもあるのではないのでしょうか。台湾の国立清華大学天文所でもそれは同じです。

この種のゼミの中で、ある日筆者の一人である橋本が銀河研究では非常に有名な論文を紹介したことがあります。この論文によれば星形成銀河には三つの要素の間に最も基本的な観測的關係があるというのです¹⁾。言うなれば星形成銀河における「三大要素」とも言えます。また、この三大要素が作る観測的關係の周りには観測エラーを超えるデータのばらつきがあることも報告されていました^{2),3)}。

筆者の一人である同大学の後藤は「三大要素の間にもまだ有意なデータのばらつきがあるなら、四つ目があるはず。」と言いました。確かに言われてみるとそのとおりです。銀河を特徴づける要素は無数に存在しますから、三つしかないと考えようが反って不自然でもあるように思えます。

これが事の発端でした。かくして筆者らは星形成銀河の「四大要素」を探ることにしたのです。

3. 二大要素から三大要素へ

筆者らによる「四大要素」の発見について述べる前に、ここでは過去の研究の歴史について簡単に触れておきます。銀河を構成している星の質量を全て足し合わせたものを「星質量」といいます。これは銀河を特徴づける一つの要素で、銀河がどれだけ重いのかという指標になります。一方、銀河にどれだけたくさん重元素が存在しているかという指標も観測的に測定する事ができます。水素の量との比をとり、これを「重元素量」と呼んでいます。重元素とは元素の周期表を眺めたときにヘリウムよりも重い元素（リチウム以降）の総称の事です。銀河観測では代表的な重元素の指標として酸素がしばしば使われます。ここでは酸素の量を「重元素量」として述べることにします。

2000年代から星形成銀河には一つの経験則があることがわかってきました。データのばらつきは非常に大きいものの、大雑把には星質量の大きい銀河ほど重元素量も多いのです⁴⁾。これを「星質量-重元素量関係」と呼ぶことにします。これは二つの要素、「星質量」と「重元素量」の関係ですから言わば銀河における二大要素です。どんなときに重元素量は増えるのでしょうか。重元素の多くは恒星の内部で起こる元素合成を経て生成されると考えられていますが、星の内部にある重元素が直接観測されることはありません。特に重い恒星がその進化の最終段階で超新星爆発することによって大量の重元素（酸素等）が星間空間にまき散らされます。このような星の誕生と死のプロセスが繰り返されることによって銀河全体の平均的な重元素量は増えると考えられています。これを重元素汚染と呼びます。

星質量-重元素量関係を説明する一つの解釈として、重い銀河ではこの星の誕生と死のサイクルが過去に効率的に進んだことによってより重元素

汚染が進んだのだとする説があります⁵⁾⁻⁷⁾。その後、この星質量-重元素量関係が詳しく調査されるにつれて、すべての銀河について同じ関係が成り立つわけではないことがわかってきました。

「星形成率」は今現在、銀河の中で単位時間に星がどれだけ誕生しているかという観測的指標です。この「星形成率」が高い銀河の星質量-重元素量関係は低重元素量側に偏っていて、「星形成率」が低い銀河は相対的に高い重元素量側に偏っていることがわかってきました¹⁾。先ほど、星質量-重元素量関係の周りには非常に大きなデータのばらつきがあると述べましたが、「星形成率」の違いによってこのデータのばらつきがある程度説明できることとなります。言い換えれば、二大要素であった星質量-重元素量関係が「星形成率」という三つめの要素を含めることによって、三大要素へと拡張されました。この三大要素の関係を「三大要素関係」と呼ぶことにします。

三大要素関係を説明する一つの解釈として、重元素汚染の進んでいない分子ガスが銀河に落ち込むことによって一時的に観測される「重元素量」が下がり、またその分子ガスが活発な星形成を引き起こすことによって「星形成率」が上がるのではないかと考えられています¹⁾。ここで一番大事な点は、第三の要素である「星形成率」を考慮することによって、星質量-重元素量関係にあった非常に大きなデータのばらつきが小さくなったということです。三大要素関係は二要素よりも詳細で本質的な関係であると言えます。

4. 主成分分析

星形成銀河における四大要素を見つけるにあたって、これまでの過去の研究からいくつかのヒントがあります。星質量-重元素量関係が星形成率だけでなく「銀河の大きさ」や「電離パラメータ」あるいは「分子ガス質量」にも依存しているという研究結果があります⁸⁾⁻¹²⁾。「電離パラメータ」とは水素を電離するだけのエネルギーをもつ

た光子（電離光子と呼ばれます）の数と星間ガスを構成する水素の数の比をとったもので、どれくらい電離光子の数が多いかという指標になります。「分子ガス質量」は星形成の元となるガスの質量ですから、「星形成率」と物理的に類似した要素になります。

ここで筆者らを悩ませたのは、無数にある観測的な要素からどうやって四大要素に見当をつけるのか、ということです。なぜ「銀河の大きさ」や「電離パラメータ」あるいは「分子ガス質量」に注目するのかという定量的な裏づけは必ずしも明確ではありません。例えばですが「銀河の形」や「銀河の色」などのほうがもしかしたら第三／第四の要素として本質的かもしれません。また、ここでは星質量-重元素量関係を出発点としていますが、「銀河の明るさ」は「星質量」とよく似た性質をもつ観測要素です。もしかしたら「星質量」よりも「銀河の明るさ」のほうがより本質的であることも十分にありえます。

そこで筆者らは主成分分析と呼ばれる手法を用いて四大要素を探し出すことにしました。主成分分析はデータ分析を行ううえでさまざまな目的に応じて用いられますが、ここでは因子負荷量と呼ばれる指標を計算することを目的としました。観測データは多かれ少なかれ必ず何らかの分布を示します。このデータの分布がどの要素によって決められているのかを定量的に表したものが因子負荷量です。

ここで、観測された要素AとBを例にして、これらの因子負荷量がどのような意味をもっているのかを図1を使って説明します。ここでAやBは例えば「星質量」や「重元素量」といった各銀河の観測値だと思ってください。一つのデータ点が一つの銀河に相当します。この観測データに対して主成分分析を行った結果、要素Aに対して得られる因子負荷量は0.7、要素Bに対して得られる因子負荷量は0.3だということがわかったとします。要素Aの因子負荷量は要素Bに比べて非常に大きい

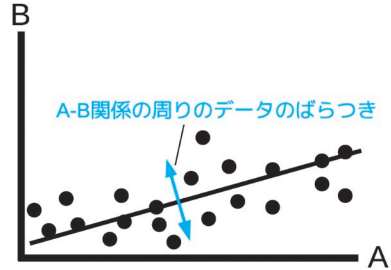


図1 観測データの例. このデータに対して主成分分析を行うと観測要素Aに対しては大きな値の因子負荷量が、Bに対しては小さな値の因子負荷量が得られます. 図2で示されているデータのばらつきはこの図の青矢印のようにして測定されています。

ですから、このデータの分布はほとんど要素Aによって決まると言うことができます。確かにこのデータの分布はほとんどA軸に沿った分布をしていて、要素Bの値が大きいかどうかということは全体のデータの分布に対してはあまり影響していないことが直観的にもわかります。言い換えれば、この因子負荷量の大きさはデータ分布に対する各要素の重要度の指標になっています。このように主成分分析のメリットの一つは観測要素の重要度を定量的に比べることができるという事です。

主成分分析のもう一つのメリットは一度に大量の観測要素を扱うことができるということです。図1はAとB二つの要素に限定した例ですが、原理的にはこの要素の数はいくらかでも増やすことができます。実際、銀河を特徴づける観測要素は数多くあります。例えば図1にCという別の観測要素を追加した場合、データは三次元空間での分布を示すことになり図1は三次元に拡張されます。四つ以上の観測要素を考える場合、つまり四次元以上の場合にはもはや一度にデータの分布を表示することはできなくなってしまいますが、主成分分析における因子負荷量の計算自体は数学的に問題なく扱うことができます。

こうして得られた因子負荷量をもとにして、因子負荷量の大きな観測要素を星形成銀河の四大要

表1 今回集めた星形成銀河の観測要素. 図中で使われている記号とそれらの意味を記してあります. 各グループの中で因子負荷量の大きい要素順に並べてあります.

| 〈質量〉 | | 〈重元素〉 | | 〈活動性〉 | |
|----------------|--------------|-------------|----------|------------------------------------|--------------|
| M_* | 星質量 | $N2O3$ | 重元素量 | M_{H_2} | 分子ガス質量 |
| M_i | i -バンドの明るさ | M_{metal} | 重元素の質量 | SFR | 星形成率 |
| M_z | z -バンドの明るさ | Av | ダスト吸収 | M_u | u -バンドの明るさ |
| M_r | r -バンドの明るさ | | | sSFR | 星形成率/星質量 |
| M_g | g -バンドの明るさ | | | M_{HI} | 原子ガス質量 |
| M_{virial} | 力学質量 | | | g-r | 色 |
| σ | 速度分散 | | | D4000 | 4,000-Å ブレイク |
| M_{igas} | 電離ガス質量 | | | EW _{Hα} | 水素輝線等価幅 |
| 〈形/大きさ〉 | | 〈環境〉 | | 〈その他〉 | |
| Σ_{M_*} | 星表面密度 | M_{halo} | ダークハロー質量 | q | 電離パラメータ |
| r_{half} | 銀河の大きさ | δ_5 | 銀河数密度 | z | 赤方偏移 |
| Σ_{SFR} | 星形成率表面密度 | | | n_e | 電子密度 |
| r_{disk} | 円盤の大きさ | | | | |
| B/T | バルジの割合 | | | | |

素の候補としてリストアップします.

5. 四大要素の候補たち

この種の統計的な解析にはなるべく多くの観測サンプルと多くの観測要素が求められます. そこで筆者らはスローンデジタルスカイサーベイ¹³⁾で得られた約4万天体の星形成銀河をサンプルとして用いました. これら4万天体についてそれぞれの銀河に対する観測要素をさまざまな論文から集め¹⁴⁾⁻¹⁷⁾, 必要に応じて筆者らが計算しました. 表1に集めた観測要素がまとめられています. 4万天体のそれぞれが合計29個の観測要素をもっていることとなります.

このようなデータに対して主成分分析を行い, 29個の観測要素それぞれの因子負荷量を計算しました. これは29次元の分析ということですからもはや頭の中では想像することはできませんが, 上述のように数学的に分析することができます. 筆者らはこれら29個の観測要素を六つのグループに分け, それぞれのグループの中で因子負荷量の値の大きいものから順番に並べました (表1). ここで六つのグループを〈質量〉, 〈重元素〉, 〈活動性〉, 〈形/大きさ〉, 〈環境〉, 〈その他〉とし,

各観測要素の名前と区別するために〈 〉をつけることにします. このグループ分けは, 四大要素の候補として似たような観測要素を複数個同時に選んでしまうことを避けるために行っています.

さて, 〈質量〉と〈重元素〉グループの中で「星質量」と「重元素量」がそれぞれ一位に輝いていることがわかります. これは私達がこれまで経験的に重要であると考えていた星質量-重元素量関係が主成分分析によっても定量的に裏づけられたこととなります. 一方で, 〈活動性〉グループでは「星形成率」よりもむしろ「分子ガス質量」のほうが重要であることが示唆されます. 各グループの中から因子負荷量の最も大きい観測要素を取り出すと, 「星質量」「重元素量」「分子ガス質量」「星表面密度」「ダークハロー質量」「電離パラメータ」が挙げられます. 「星表面密度」とは星質量を銀河の面積で割った値で, 銀河の質量密度がどれだけ高いかという指標となります. 「ダークハロー質量」とは各銀河をそれぞれ取り囲んでいると考えられているダークマター (暗黒物質) ハローの質量です. これらに加えて, 過去の研究で報告されていた要素である「銀河の大きさ」と「星形成率」をまとめて四大要素の候補と

します。

6. 四大要素の発見

主成分分析によって29個の観測要素から重要な要素をある程度絞ることができました。ここでいったん、星質量-重元素量関係が二大要素から三大要素へ拡張されたことを振り返ってみましょう。

星質量-重元素量関係にはその周りに大きな観測データのばらつきがありました。第三の要素を導入することによってデータのばらつきが減り、三大要素関係が提案されたのでした。ここで一つの道標として、データのばらつきが少ない関係こそがより正確で星形成銀河にとって本質的であると考えることができます。

そこで筆者らは四大要素の候補たちのさまざまな組み合わせによって作られる観測的關係を調べ、その周りに分布するデータのばらつきを調べました。まず最初に二大要素である「星質量」と「重元素量」に対する他要素のデータのばらつきを調べます。その中で最もばらつきが小さいものを第三の要素とします。次に、「星質量」、「重元素量」、「決定された第三の要素」に対する、他要素のばらつきを改めて調べます。こうして、最終的にデータのばらつきが最も小さくなる四つの要素を見つければ、それが星形成銀河を司る四大要素となるわけです。

図2(a)に候補要素の組み合わせごとのデータのばらつき度合いを示しています。図2(a)の丸印(○)は三大要素の組み合わせを、星印(★)は四大要素の組み合わせを表しています。また、図中で上にいくほどデータのばらつきが大きく、下にいくほどばらつきが小さいことに対応しています。

まず図の左半分から見ていきましょう。「ダークハロー質量 (M_{halo})」「星表面密度 (Σ_{M_*})」「電離パラメータ (q)」「銀河の大きさ (r_{half})」は星質量-重元素量関係の次にくる第三の要素としてはデータのばらつきがあまり小さくないことがわ

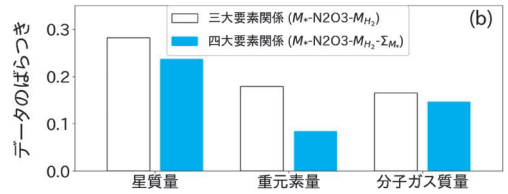
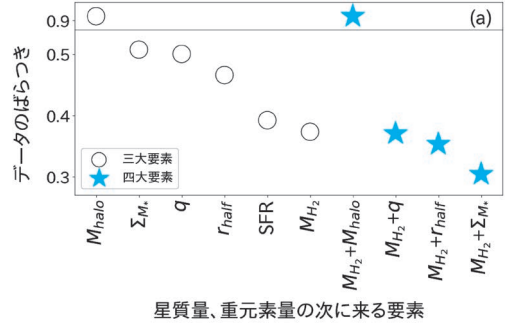


図2 (a) 星質量と重元素量の次にくるさまざまな要素の組み合わせとデータのばらつき度合い。丸印は三大要素の組み合わせを、星印は四大要素の組み合わせをそれぞれ示しています。「星質量」「重元素量」「分子ガス質量」「星表面密度」の組み合わせ(一番右の星)が最も小さいばらつきを示しています。(b) 第四の要素として「星表面密度」を組み込む前後でのデータのばらつきの比較。データのばらつきは各要素ごとの内訳として表示されており、特に「重元素量」のばらつきが小さくなっていることがわかります。

かります。一方、「分子ガス質量 (M_{H_2})」は第三の要素としては小さなデータのばらつきを示しています。これまで第三の要素として提案されていた「星形成率 (SFR)」もほぼ同じ程度のばらつきですが、僅かに大きい値を示しています。この事は主成分分析で「分子ガス質量」の因子負荷量が「星形成率」よりも大きかったこととも一致します。このことから、星質量-重元素量関係の次に来る第三の要素は「分子ガス質量 (M_{H_2})」であるという結果が得られました。

次に、第四の要素を調べます(図2(a) ★印)。「星質量」「重元素量」「分子ガス質量」の三つの要素に残りの四つの要素を加えてデータのばらつきを調べました。その結果、「ダークハロー質量

(M_{halo})「電離パラメータ (q)」「銀河の大きさ (r_{half})」ではデータのばらつきはほとんど変わらないか、あるいは反って大きくなってしまいましたが、「星表面密度 (Σ_{M_*})」ではばらつきが最も小さくなるのがわかりました (図2(a)の一番右★).

このようにして筆者らは星形成銀河の四大要素として「星質量」「重元素量」「分子ガス質量」「星表面密度」を発見しました. これらの要素によってできる観測的關係を「四大要素關係」と呼ぶことにします. さて、「星表面密度」を最後に加えることによって何故データのばらつきが小さくなったのでしょうか. 図2(b)は第四の要素として「星表面密度」を加える前後のデータのばらつきを示しています. ただしここではデータのばらつきは各要素ごとの内訳として示されています. 「星表面密度」を加えることによって全体的にデータのばらつきは小さくなっていますが, 特に「重元素量」の軸方向に対してばらつきが小さくなっています. これは「星表面密度」が「重元素量」と何らかの形で結びついており, それを四大要素關係が取り込んだことによってデータのばらつきが小さくなったのだと解釈することができます.

7. 物理的解釈

第3章で述べたように, 星形成銀河における星質量-重元素量關係は, 重い銀河ほど過去に効率的な星形成が起こったことでより重元素汚染が進んだ結果だと考えられています. また, 三大要素關係は重元素汚染の進んでいないガスの銀河への落下と星形成の密接な關係を示唆しています. これらは物理的解釈の一つではありますが, 星形成銀河の基本的な關係を発見することで銀河のより詳細な理解が進んできました.

筆者らが発見した四大要素關係もまた星形成銀河に新しい物理的描像をもたらしてくれます. 図2(b)は「星表面密度」と「重元素量」の間に何

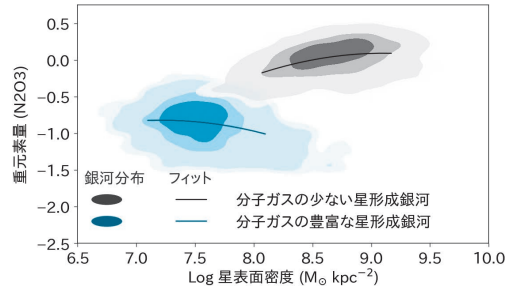


図3 第四の要素「星表面密度」と「重元素量」との關係. 二つの要素の間の關係をわかりやすく表示するために, 他の要素である「星質量」と「分子ガス質量」については一定の値を示す銀河のみを選択しています. 黒色の等高線は分子ガスの少ない銀河の分布を, 青色の等高線は分子ガスの豊富な銀河の分布を示しています. 曲線はそれぞれのグループの分布を関数でフィットしたものです.

らかの關係があることを示唆していました. このことをより直接的に示したのが図3です. この図では観測データ点の分布を等高線で表示しています. 「星質量」と「分子ガス質量」がある一定範囲内にある銀河だけを取り出して, 「星表面密度」と「重元素量」の關係を表示しています. 四次元のデータすべてを一度に表示させることは難しいので, ここでは四つのうちの二つ「星質量」と「分子ガス質量」の値を固定して, 残りの二つ「星表面密度」と「重元素量」の間にある關係を見えています. 図3には色分けされた二つのグループがあります. これら二つのグループの違いは, 分子ガス-星質量比の違いに対応しています. 分子ガス-星質量比とは分子ガス質量を星質量で割った値で, 銀河にどれだけ豊富に分子ガスが存在するかという指標です. 黒色の等高線は分子ガスの少ない星形成銀河, 青色の等高線は分子ガスの豊富な星形成銀河です.

分子ガスの少ない銀河 (黒色等高線) から見てみましょう. このような星形成銀河には「星表面密度」と「重元素量」の間に正の相関關係があることがわかります. この關係はこれまで述べてきた星質量-重元素量關係とよく似ています. これ

まで「星質量」の大きい銀河では過去の星形成の効率が大きく、結果として重元素汚染がより進み「重元素量」も高くなると考えられてきました。「星表面密度」と「重元素量」の正の相関関係は、星形成の効率が「星質量」だけでなく「星表面密度」にも依存していることを示唆しています。同じ「星質量」をもつ銀河であっても「星表面密度」の高い銀河では星形成の効率がより高かった事になります。これまでは銀河全体における星形成の効率と「星質量」との間に1対1の対応関係が考えられてきましたが、これに「星表面密度」の概念が導入されて、2変数的な解釈に拡張されたと言えます。

次に、分子ガスの豊富な銀河（青色等高線）を見てみましょう。このような星形成銀河は先ほどと打って変わり、負の相関関係を示しています。つまり、「星表面密度」が高いほど「重元素量」が低くなっています。このように、「星表面密度」と「重元素量」間で見られた異なる傾向は星形成に関係する物理が、分子ガスが豊富な銀河と分子ガスが少ない銀河において異なるためだと考えられます。その鍵となるのが「分子ガスの豊富さ」であると筆者らは考えています。分子ガスが豊富に存在しているということはこれまで述べてきたように、重元素汚染のあまり進んでいないガスが周囲から銀河に落下し星形成を促している、そういった過程が特に顕著に現れていると期待されます。ガスが銀河に落下し星形成が促されるとその領域は非常に明るくなります。銀河全体の「重元素量」を測定する時には、この明るい領域、つまり新たに星形成の引き起こされた領域での「重元素量」が優先的に反映されると考えられます。つまりここでは、ガスの落下によって新たに引き起こされる星形成領域での「重元素量」が「星表面密度」とどう関係してくるのかということがポイントになります。

ここで図4にあるような二つの極端なケース(1)と(2)について考えてみましょう。ケース

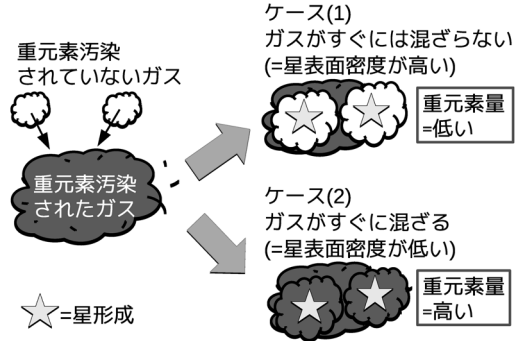


図4 分子ガスの豊富な星形成銀河における「星表面密度」と「重元素量」の関係。ガスが混ざり合う時間が長ければケース(1)へ、短ければケース(2)へ進むと考えられます。

(1)は落下してくるガスが銀河内にあらかじめ存在しているガス(すでに重元素汚染されているガス)とすぐには混ざり合わない場合です。この場合、新たに引き起こされる星形成は重元素汚染のあまり進んでいないガスの中で起こります。このような銀河の「重元素量」を測定すると、明るくなった領域つまり重元素汚染のあまり進んでいない場所の「重元素量」が優先的に反映されると考えられます。つまり相対的に低い「重元素量」が期待されるわけです。

ケース(2)は落下してくるガスが銀河内にあらかじめ存在しているガスとすぐに混ざり合ってしまう場合です。この時新たに引き起こされる星形成領域はすでに重元素汚染の進んだガスと混じり合った状態です。このような銀河の「重元素量」を測定すると、すでにガスが混じり合った後の「重元素量」が優先的に反映されるはずで、この場合には相対的に高い「重元素量」が期待されます。

ここでケース(1)と(2)からは全く異なる「重元素量」が予想されていて、これら二つのケースの分かれ道はガスが混ざり合う時間と星形成に要する時間の大小関係です。ケース(1)では(ガスが混ざり合う時間)>(星形成に要する時間)ですが、ケース(2)では(ガスが混ざり合

う時間) < (星形成に要する時間) となります。言い換えれば、ガスが混ざり合う時間と星形成に要する時間の比が分かれば道となっています。詳細は省きますが、実はこの比が質量密度の平方根に比例していると言われてます⁸⁾。「星表面密度」の大きい銀河ではこの比が大きくケース (1) へと、「星表面密度」の小さい銀河ではこの比が小さくケース (2) へといきます。その結果、「星表面密度」の大きい銀河では「重元素量」が相対的に低く、「星表面密度」の小さい銀河では「重元素量」が相対的に高いという傾向が生まれるはずで、このことは図3 (青色) で実際に観測された傾向と一致します。

まとめとして、筆者らが発見した四大要素関係は星形成効率や重元素汚染、ガスの混合など星形成銀河を取り巻く複雑な物理過程を示唆しています。今後構築される銀河形成に関連する理論モデルやシミュレーションは四大要素が作る観測的關係を再現する必要があります。

8. 第五の要素

ここで、第五の要素の有無について触れておきます。冒頭で星形成銀河における基本的な要素が三つしかないと考えるのは不自然だという話をしました。それでは四つあれば十分なのでしょうか。これもやはり四つである必然性はないように思われます。第五の要素はあるのでしょうか。

図5の黒線は三大要素関係の周りに分布するデータのばらつきをヒストグラムで表示したものです。このデータのばらつきの範囲 ($\sigma=0.072$) は観測エラー ($\sigma_{\text{obs}} \sim 0.04$) よりも有意に広がっていて、第四の要素が存在する事を表しています。実際に第四の要素である「星表面密度」を加えることでデータのばらつきが小さくなっていることがこの図においても確認できます (青色)。第四の要素を加えた後のデータのばらつきの範囲 ($\sigma=0.034$) は観測エラー ($\sigma_{\text{obs}} \sim 0.04$) から予想されるデータのばらつきとほぼ一致しています。

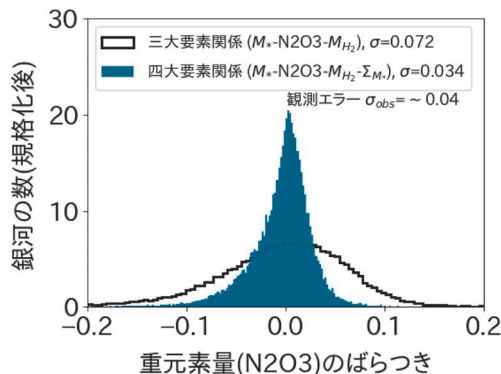


図5 三大要素関係の周りに分布するデータのばらつき (黒線) と四大要素関係の周りのデータのばらつき (青色)。

つまり四大要素関係の周りのデータのばらつきは観測エラーで支配されていて、これ以上の詳細を調べられないことを意味しています。第五の要素は存在するかもしれませんが、現在の観測データセットではこれ以上を追求することは難しいと言えます。すばる超広視野分光観測等を始めとする次世代の大規模サーベイ観測によるクオリティの高いデータによって観測エラーが小さくなれば、第五の要素が将来発見されるかもしれません。

9. 終わりに

最後に、本稿の元となった論文¹⁸⁾が出版されるまでの顛末を短く紹介しておきます。本稿の出発点となっている星質量-重元素量関係や三大要素を発見した論文は引用文献数が500~2000と非常に多く、銀河研究に多大な影響を与えたと言っても過言ではありません。その拡張版である四大要素の発見もまた銀河研究において重要な役割を持つと筆者らは信じています。そこで筆者らはこの論文を科学雑誌「Nature Astronomy」に投稿しました。残念ながら「Nature Astronomy」誌に掲載される事はありませんでしたが、最終的には三大要素に関する論文が掲載された雑誌「Monthly Notices of the Royal Astronomical Society」誌に掲載されました。

この過程で合計6人ものレフェリーに審査され、多くの苦難がありました。幾度もの改訂を経て論文はより良いものになりました。将来第五の要素が明らかになった暁には、再び「Nature Astronomy」へ投稿するチャンスがあるかもしれません。

謝 辞

本稿の科学的な内容は、2018年に筆者らが発表した論文¹⁸⁾に基づいています。詳しくはそちらをご覧ください。本稿執筆の機会を与えてくださった編集員長の小宮山裕氏に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

1) Mannucci, F., et al., 2010, MNRAS, 408, 2115
 2) Salim, S., et al., 2014, ApJ, 797, 126
 3) Salim, S., et al., 2015, ApJ, 808, 25
 4) Tremonti, C. A., et al., 2004, ApJ, 613, 898
 5) Brooks, A. M., et al., 2007, ApJ, 655, L17
 6) Dalcanton, J. J., 2007, ApJ, 658, 941
 7) Calura, F., et al., 2009, A&A, 504, 373
 8) Ellison, S. L., et al., 2008, ApJ, 672, L107
 9) Nakajima, K., & Ouchi, M., 2014, MNRAS, 442, 900
 10) Bothwell, M. S., et al., 2013, MNRAS, 433, 1425
 11) Bothwell, M. S., et al., 2016a, MNRAS, 455, 1156
 12) Bothwell, M. S., et al., 2016b, A&A, 595, A48

13) Abazajian, K. N., et al., 2009, ApJS, 182, 543
 14) Kauffmann, G., et al., 2003, MNRAS, 346, 1055
 15) Brinchmann, J., et al., 2004, MNRAS, 351, 1151
 16) Salim, S., et al., 2007, ApJS, 173, 267
 17) Teimoorinia, H., et al., 2017, MNRAS, 464, 3796
 18) Hashimoto, T., et al., 2018, MNRAS, 475, 4424

A New Parameter in the Fundamental Metallicity Relation of Star-Forming Galaxies
Tetsuya HASHIMOTO, Tomotsugu GOTO, and Rieko MOMOSE

Institute of Astronomy, National Tsing Hua University

Abstract: Star-forming galaxies display a close relation among stellar mass, metallicity and star-formation rate, known as the fundamental metallicity relation (FMR). There still remains a significant residual scatter around the FMR, suggesting the existence of a fourth parameter. We show here that the fourth parameter reduces the dispersion around the molecular-gas FMR down to the observational error. We suggest that future analyses and models of galaxy evolution should consider the FMR in a four-dimensional space.