

配布先: 文部科学記者会、科学記者会、名古屋教育記者会

2024年3月4日

報道機関 各位

## 銀河系に降り積もる水素ガス ～系外起源とする有力な証拠を発見、二十年来の状況打開～

### 【本研究のポイント】

- ・私たちの住む銀河系(天の川)の重力に引かれて落下するガス雲(高速度雲・中速度雲<sup>注1)</sup>)の重元素<sup>注2)</sup>量分布の、全天にわたる詳細な地図を世界で初めて作成。
- ・「中速度雲の重元素量は太陽系周囲のガスと同程度」とされてきた定説を覆し、低重元素であることを示した。銀河系外に起源を持つ証拠を初めて検証。

### 【研究概要】

宇宙における重元素量は、宇宙の進化を解明する上で必須の重要な値です。特に銀河系周辺における重元素の定量は、銀河系の起源解明における最も重要な課題のひとつです。名古屋大学大学院理学研究科の早川 貴敬 研究員と福井 康雄 名誉教授の研究チームは、銀河系に落下するガス雲(高速度雲・中速度雲)の重元素量分布の、全天にわたる精密な地図を世界で初めて作成しました。

この分野では、高輝度の遠方銀河・恒星を背景光源として吸収線スペクトルを使った測定が行われ、全天で数十箇所という極めて少ない情報を元にした議論が続けられてきました。本研究はこの状況を革新し、全天の重元素量を飛躍的広範囲で導いた点で、大きな意義があります。本研究の結果からは、「重元素量が太陽系周囲のガスとほぼ同じであり、超新星爆発などによって吹き上げられた銀河系噴水モデル的な物質の循環である」と説明されてきた中速度雲について、重元素量が太陽周囲の3分の1以下である成分が多く含まれていることが明らかになりました。さらに、重元素量の多い銀河系のガスと混合している証拠を示し、中速度雲の大部分が系外由来の始原的ガスである可能性を明らかにしました。本研究によって、銀河系に落下するガス雲の起源について、二十年来の膠着状況が打開され、100億年規模の銀河系の成長進化について新たな研究展開が期待されます。さらに本成果は、宇宙の銀河一般の進化研究にも波及し、関連する研究分野に広くインパクトを与えることが予想されます。

本研究成果は、2024年2月28日付天文学術雑誌「Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (王立天文学会月報)」に掲載されました。

## 【研究背景と内容】

私たちが住む銀河系(天の川)や他の銀河がどのようにして生まれ、進化しているのかは、天文学の大きな問題です。暗黒物質を除くと、銀河は星と大量のガスで構成されていて、ガスのほとんどは水素です。1950年代から始まった、中性水素原子から放射される波長 21cm の電波(21cm 線)の観測によって、銀河系の円盤部だけでなく、その外にも相当の水素ガスが存在し(高速度雲・中速度雲)、大半が我々に対して近づくように動いていることがわかってきました(図 1)。「今なお、銀河の重力に引かれたガスが降り積もって来ている」という説が 1960 年代に提唱されます。銀河の外から、重元素で「汚染」されていないガスが降ってくるという考え方は、その後知られるようになった G 型矮星問題<sup>注 3)</sup> や銀河のガス消費ジレンマ<sup>注 4)</sup> を上手く説明できることから、広く受け入れられるようになりました。

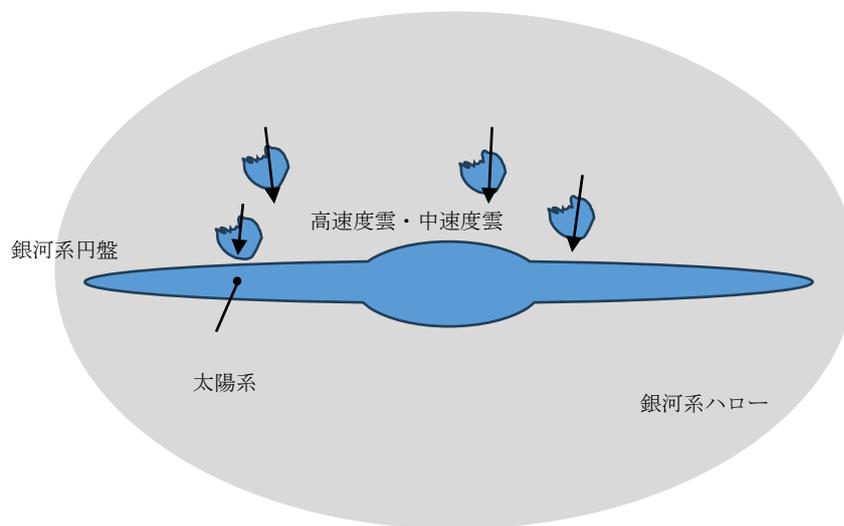


図 1 模式的に示した銀河系の構造。直径 10 万光年の円盤(この図では真横から見ている)に、太陽系を含めた恒星やガスが集中している。高速度雲・中速度雲の大半は、円盤の外にあって落下しつつあるガスと考えられている。なお、この図は概念を説明するものであり、形・大きさなどを正確に表現した物では無い。

一方、高速度雲・中速度雲を説明するもう一つの説として、銀河円盤のガスが大質量星の爆発などによって吹き飛ばされ、再び銀河面に落下する、いわゆる「銀河系噴水モデル」<sup>注 5)</sup> が提唱されます。どちらのモデルが「正解」か、重要な手がかりの一つが重元素量(水素に対してどれぐらいの割合で重元素が含まれるか、重元素/水素比)です。ガスに含まれる微量の重元素は恒星内の核融合反応や超新星爆発によってのみ合成されるので、銀河系内を循環するガスでは多く、系外から飛来するガスには少量しか含まれません。

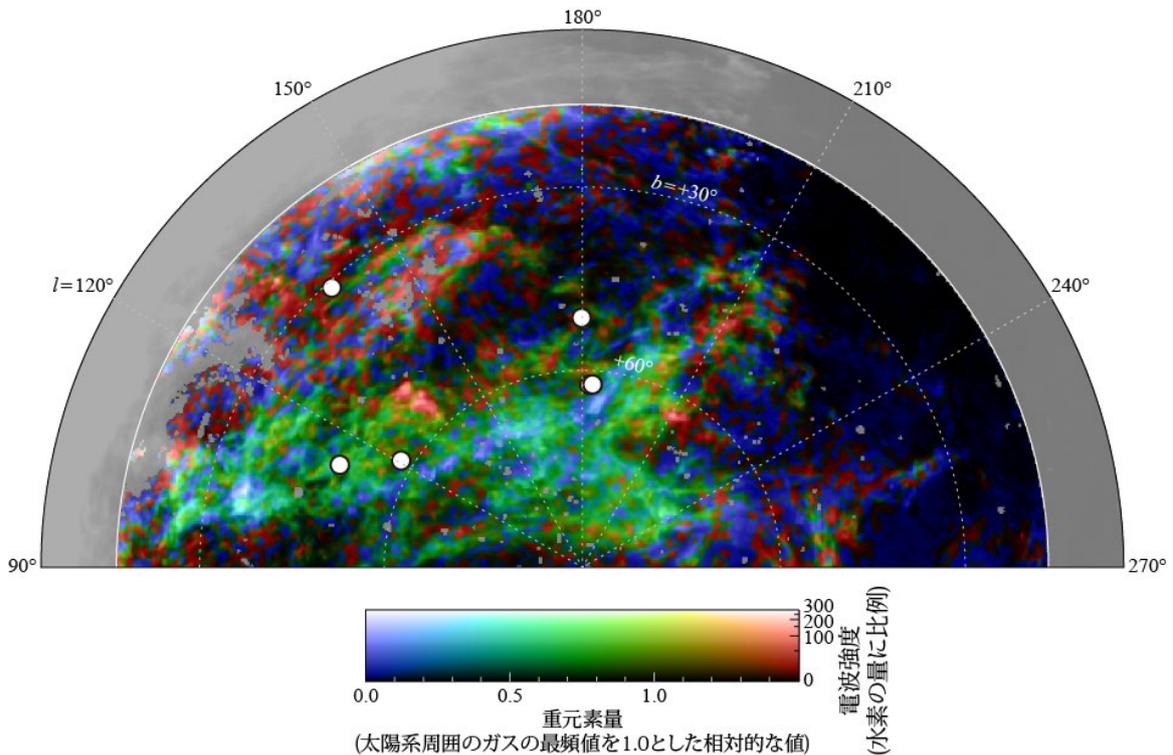


図 2 中速度雲の重元素量地図(この図では全天の 1/4 を表示している)。太陽系周囲のガスを基準として、少量の重元素しか含まれないガスは青、重元素過剰なガスは赤になるよう色付けされている。丸印はこれまで吸収線観測による測定が行われてきた箇所、本研究によって情報量が飛躍的に増えたことは一目瞭然である。

1990 年代から 2000 年頃に集中して行われた、原子吸収線スペクトル<sup>注 6)</sup>による測定によって、中速度雲は太陽系の周囲のガスと同程度の重元素量で噴水モデル的な物質の循環、高速度雲は 10 分の 1 程度の重元素量で銀河系外から落下しつつあるガスと報告・解釈されました。しかし、これらの測定は、非常に明るい遠方銀河・星を背景光源として使う必要があり、高々数十箇所の測定に留まります(高速度雲・中速度雲の広がりになれば、非常にまばらです)。手法的限界により、これ以上の進展が期待できないこともあり、観測研究はその後ほとんど発展していませんでした。

本研究チームの福井名誉教授らは、2015 年頃よりプランク衛星<sup>注 7)</sup>国際共同研究チームに参加し、星間ガスとサブミリ波のダスト<sup>注 8)</sup>放射の相関の研究に着手していました。そこで福井名誉教授らは、プランク衛星による研究の一環として、ダストと星間ガスの中性水素原子の相関関係を調べ、水素原子の精密定量の手法を開拓し、独自の領域を拓きました (Fukui et al. 2014, 2015)。今回の成果はその延長線上にあります。

研究チームはまず、21cm 線と、プランク衛星によるダストの2種類の高解像度全天地図を使って、高速度雲、中速度雲、そして比較の基準となる太陽系周囲のガスのそれぞれについて、重回帰分析、地理的加重回帰分析の手法を使って、ダスト/水素比 (重元素/水素比と見做してほぼ差し支えない)の地図を作成しました。図 2 はそのうちの一部です。この手法は、背景光源を使わないため、任意の方向での重元素量測定が可能となり、情報量が飛躍的に増加したことで、今回の革新的成果につながりました。更に、得られた情報を統計的に分析し(図 3)、これまで「中速度雲の重元素量は太陽系周囲のガスとほぼ同じである」とされてきた定説が誤りであり、中速度雲の大部分が重元素量の低い始原的ガスである可能性を明らかにしました。

## 【成果の意義】

従来の定説では、

- ・ 高速度雲は数万光年の高度にあって落下しつつある重元素の少ない始原的なガス
- ・ 中速度雲は数千光年の高度にあって、銀河円盤のガスが噴水的に循環しているもの
- ・ G 型矮星問題やガス消費のジレンマは銀河円盤にガスが流入している間接的な証拠と説明されてきました。しかしよく考えると、これでは 3 つの層が上手く繋がっていません。例えば、「落下してきたガスは一度全て電離され(つまり、水素イオンとなって)、再び中性水素に戻る」というような説も唱えられましたが、観測的証拠に欠け、広く支持されているとは言えません。

中速度雲が噴水的な循環ではなく、落下しつつある始原ガスであり、元は高速度雲であった物が銀河円盤のガスと相互作用することで減速・混ぜり合う過程を見ているとしたら、単純明快、統一的に銀河系の進化を説明することが可能になります。また、本研究では私たちの住む銀河系を対象としていますが、他の銀河でも、同様に説明できる可能

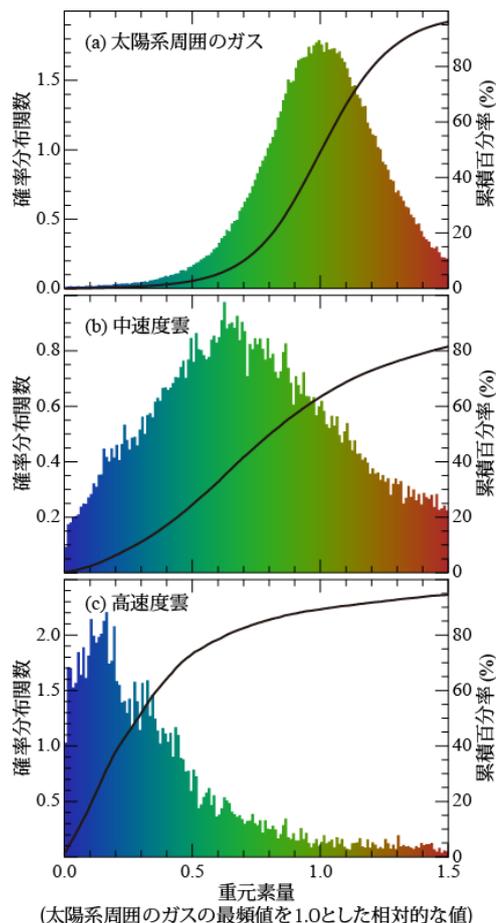


図 3 (a)太陽系周囲のガス、(b)中速度雲、(c)高速度雲の重元素量を統計的に示した。左に寄っているほど重元素が少ないことを示し、これまでの定説では「太陽系周囲のガスとほぼ同じ」とされてきた中速度雲の重元素が、明らかに少ない事を示している。

性が当然にあります。

本研究は、日本学術振興会科研費 JP15H05694, JP21H00040, JP22H00152 の助成を受けて行われました。

## 【用語説明】

### 注 1) 高速度雲・中速度雲:

太陽系から観測される中性水素ガスのほとんどは銀河系の回転運動に従っているが、大きく外れた視線速度を示すものがある。それらのうち、特に速度が大きい物(およそ毎秒 100km 以上)を高速度雲、やや速度が低い物(およそ毎秒 30-100km)を中速度雲と呼ぶ。中速度雲は数千光年、高速度雲は数万光年の高さにあって落下しつつある天体と考えられている。銀河系の進化と密接な関係があると考えられているが、未解明な点も多い。

### 注 2) 重元素:

天文学では水素・ヘリウム以外の元素を重元素と呼ぶ。恒星内の核融合反応や超新星爆発によってのみ合成されるので、銀河系内を循環するガスには多く含まれ、系外から飛来するガスには少量しか含まれない。ただし、いずれの場合でも水素に比べればごく微量である(太陽表面で、水素に対する質量比が約 1%)。

### 注 3) G 型矮星問題:

もし銀河が物質の流入や流出が全く無い閉じた系だと仮定すると、恒星内あるいは超新星爆発時に重元素が作られ、周囲にばら撒かれる過程を繰り返して行けば、星間ガス中の重元素は時間と共に増えていくはずである。しかし、実際にはほとんど変わっていないと推定されている。G 型矮星(太陽と同程度の表面温度を持ち主系列=安定状態にある恒星)の観測から判明したので、「G 型矮星問題」と呼ばれている。重元素で「汚染」されていない始原的なガスの流入の間接的な証拠であるという考え方が、現在では主流である。

### 注 4) 銀河のガス消費ジレンマ:

銀河が閉じた系だと仮定して、恒星の原料である水素ガスの量を1年間で生まれる星の量で割ると、計算上、はるか昔に使い果たしたという推定が成立し、実際には今なお星が作られ続けていることと矛盾する。故に、銀河の外からガスが継続的に供給されているという考え方が、現在では主流である。

### 注 5) 銀河系噴水モデル:

シャピロ、フィールドによって 1970 年代に提唱されたモデルで、銀河円盤のガスが大質量星の爆発などによって吹き飛ばされ、再び銀河面に落下すると説いている。長年、中速度雲を説明するモデルとして多く引用されてきた。

### 注 6) 原子吸収線スペクトル:

非常に明るい遠方銀河・恒星を背景光源として観測し、波長ごとに分けて強度を測定すると、いくつかの特定の波長だけ暗くなっていることがある。手前にある物質

によって光が吸収されていることを表しており、吸収線と呼ばれる。波長と強度(どれだけ暗くなっているか)を精密に測定することで、前後関係(光源の方が手前であればそもそも吸収線は表れない)、原子(またはイオン)の種類と量、視線速度(ドップラー効果による)を知る事が出来る。

注 7) プランク衛星:

欧州宇宙機関(ESA)が 2009 年に打上げた人工衛星。名称は、ドイツの科学者マックス・プランク(M. Planck)にちなんでいる。宇宙背景放射の観測が主たる任務であったが、観測する波長帯がダスト放射(次項)と大きく重なるため、銀河系内の物質の情報も反映されている。

注 8) ダスト:

1 ミクロン(1/1000 ミリ)程度の大きさの固体微粒子。酸素、炭素、マグネシウム、ケイ素、鉄を主要な元素として構成されている。ダストの量はガス中の重元素量に比例すると考えられているので、本研究の枠組みではダスト/水素比を重元素/水素比と見做してもほぼ差し支えない。絶対温度で 20 から 30 度(摂氏温度でマイナス 250 から 240 度)程度で、遠赤外線からサブミリ波(波長約 100 ミクロンから 1 ミリメートル)の放射を放つ。

**【論文情報】**

雑誌名: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (王立天文学会月報)

論文タイトル: Dust-to-neutral gas ratio of the intermediate- and high-velocity HI clouds derived based on the sub-mm dust emission for the whole sky

著者: 早川貴敬, 福井康雄 (名古屋大学大学院理学研究科)

DOI: 10.1093/mnras/stae302