

「見えない」物質分布と 「見える」銀河と銀河間ガスの三角関係



百瀬 莉恵子

〈Carnegie Observatories, 813 Santa Barbara Street, Pasadena, CA 91101, USA〉

e-mail: rmomose@carnegiescience.edu

宇宙で最大の構造である「見えない」ダークマターによる大規模構造は、「見える」銀河や銀河間ガスの分布に反映されると考えられています。そのため、赤方偏移2以遠の大規模構造や、その構造の一部である原始銀河団のような高密度領域の探査には、銀河の分布や銀河間ガスの密度分布が用いられています。しかし実際に私たちが観測できるのは、宇宙空間に存在する銀河や銀河間ガスの一部だけです。では、観測できた銀河や銀河間ガスから大規模構造は正しく推定できるのでしょうか？また、独立な観測指標である銀河と銀河間ガスは、同じ大規模構造をなぞっていると思わせるのでしょうか？我々は、観測データと数値シミュレーションを用い、銀河-銀河間ガス-ダークマターの大規模構造の三者の関係を調査し、この問いの解明に挑戦しています。本稿では、観測データから得られた最新の研究成果を紹介し、三者の関係を議論します。

1. はじめに

1.1 大規模構造の観測的な推定

宇宙論の目標の一つは、宇宙に存在する銀河、銀河が群れ集まった銀河団等の様々な階層的な構造の形成過程を解明することです。現在の標準的な構造形成理論は、冷たいダークマター (cold dark matter; CDM [1-3]) とダークエネルギー (Λ) によって支配された Λ CDM モデルです。このモデルは、宇宙マイクロ波背景放射や銀河の分布等の数多くの観測データを高い精度で整合的に説明することができます (例えば [4-6])。

Λ CDM モデルでは、ダークマターの重力が重要な役割を果たします。なぜなら、宇宙初期に存在した物質分布の空間的非一様性 (密度ゆらぎ) が、ダークマターの重力によって成長し、ダークマターが空間的に集まった領域に星、銀河、そして銀河団を138億年という年月をかけて形成してきたと考えられているからです。

密度ゆらぎの成長の痕跡を最も色濃く残す構造は、ダークマターが織りなす非一様な分布である大規模構造です (図1)。大規模構造を正しく描き出すことは構造形成の理解に不可欠です。

ダークマターは電磁波では見えません。そこで、大規模構造の観測的な推定には銀河が指標として用いられます。銀河は基本的にダークマターの密度が高い領域で形成されるため、銀河の分布は大規模構造をなぞっているとみなすことができるのです。実際、数値シミュレーションでは、銀河の分布と大規模構造の密度分布のパターンが一致していることが確認されています (例えば図1参照)。観測的には、近傍宇宙では、銀河の全天赤方偏移サーベイにより得られた銀河の位置情報 (赤経, 赤緯, 分光赤方偏移) を用いて、三次元的に大規模構造の推定が行われています。一方遠方宇宙 (赤方偏移 $z \geq 2$) では銀河が暗くなるため、銀河の全天分光探査による大規模構造の三次元的な推定は困難です。そこで、遠方宇宙の大規模構

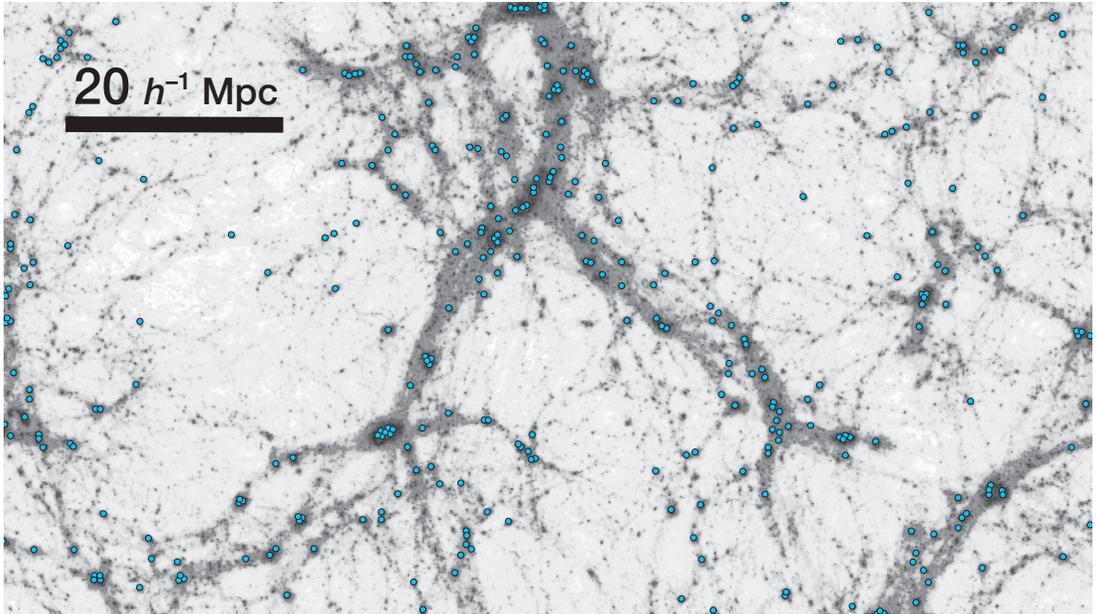


図1 シミュレーションで再現されたダークマターの大規模構造。白色から濃灰色になるにつれて密度が高くなっています。銀河は青色の丸で表されています (GADGET3-Osaka [7, 8])。

造は、撮像観測から得られる銀河の二次元的な空間分布から推定されています。

遠方宇宙では銀河以外にもダークマターの大規模構造の観測指標があります。それは、銀河間ガスの密度分布です。銀河と銀河の間を満たす銀河間空間は真空ではなく、銀河間ガス（主成分は水素）と呼ばれる低密度なガスが存在します。この銀河間ガスもまた、銀河と同じようにダークマターの密度分布をなぞるように分布していると考えられています。事実数値シミュレーションにおいて、銀河間ガスの密度分布が大規模構造を反映していることが確認されています。

銀河間ガスの観測は、クェーサー (QSO) のような明るい天体のスペクトルに現れる吸収線を指標として用います。中でもよく用いられる吸収線は、中性水素 (HI) のガス雲の群れにより生

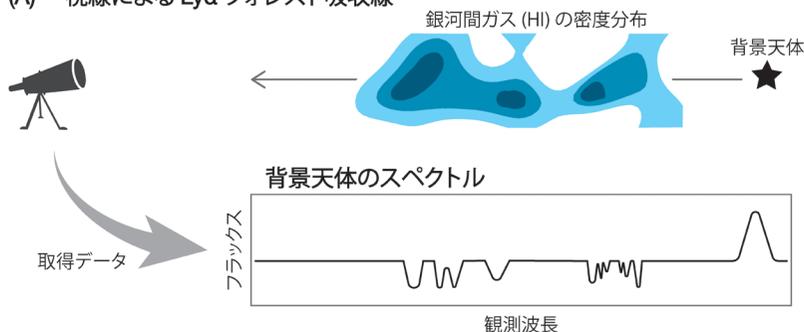
じる「Ly α フォレスト吸収線^{*1}」です。天体のスペクトルに生じるLy α フォレストの観測波長と吸収の深さを測定すれば、その視線上での銀河間ガスの密度が推定できます (図2-A)。そしてこの吸収線の測定を多数の天体 (視線) で行うことで大規模構造が推定できるのです (図2-B)。

1.2 観測指標による大規模構造推定の問題

前述のように、数値シミュレーションでは銀河の分布も銀河間ガスの密度分布も大規模構造と一致していることが確認されています。しかし、実際に観測されている銀河や銀河間ガスでもダークマターの大規模構造を正しく推定できているのでしょうか？この問いに答える方法の一つは、銀河と銀河間ガスの分布を比較することです。理論的には、銀河も銀河間ガスも同じダークマターの分布をなぞるため、すべての銀河／銀河間ガスを検

^{*1} Ly α フォレストは、明るい天体のスペクトルに現れる吸収線のうち、銀河間空間中のHIガスが自身の系でのLy α 光子を吸収することで生じる吸収線系の一つです。吸収線を生じるガス雲が視線方向の広い範囲にわたり多数存在している場合、天体のスペクトルには密集したような吸収線が現れます。この吸収線の密集は、総称して“フォレスト (森)”と表現されています。

(A) 一視線による Ly α フォレスト吸収線



(B) 複数視線による Ly α フォレスト吸収線

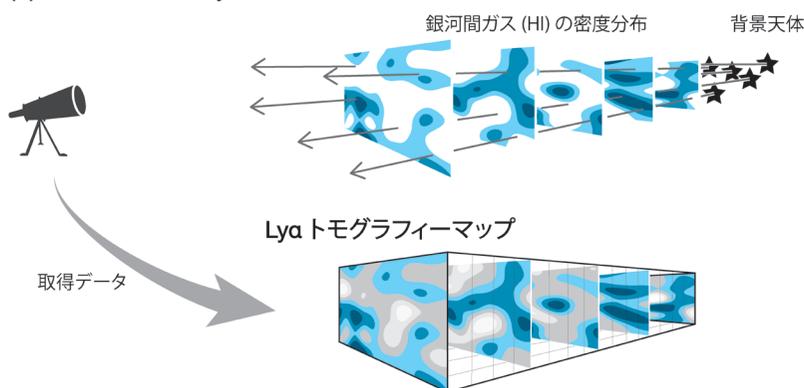


図2 (A) 一視線と (B) 複数視線による Ly α フォレスト観測および、取得されるデータのイメージ図. コントラは銀河間ガスの密度分布を表しており、青色が濃くなるほどHIガス密度が高いことを意味します (密度分布は CLAMATO を使用 [9, 10]).

出できれば両者の空間分布／密度分布は一致するはずですが、しかし実際は、以下のような観測的な制約により、すべての銀河／銀河間ガスを検出できるわけではないため、両者の分布が一致するかどうか自明ではありません。

銀河間ガスの場合、Ly α フォレストの観測だけでは真の大規模構造の密度分布を同定できない場合があります。一般的には、物質が大量に集まる高密度領域では銀河間ガスも多量に存在し、Ly α フォレストによる吸収量も強くなるはずで

す。数値シミュレーションでも、HIガスと大規模構造は数 $h^{-1} \text{Mpc}^{*2}$ 以上という大きなスケールではよく一致していることがわかっています。しかし、Ly α フォレストがトレースするガスはあくまで中性状態のガスであるため、電離ガスが多い高密度領域ではLy α フォレストによる吸収量は弱くなり、観測的にはその領域でのダークマター密度が低いと示唆される可能性があります。

銀河の場合も、推定された銀河の空間分布が大規模構造を忠実に反映していない場合があります。得

*2 h とはハッブル定数 H_0 を $100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ で規格化した無次元のハッブル定数です ($h \equiv H_0/100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$)。本研究では $h=0.7$ を使用しています。また本研究では、共動距離 (comoving distance) を使用しています。

す。遠方宇宙において検出される銀河は、観測手法に制限される特定の銀河種族であることが多く、すべての銀河ではありません。また観測時間の制限により、暗い銀河を取りこぼしている可能性も考えられます。その結果、観測できた銀河の分布が、ダークマターの密度分布と異なるという可能性もあるのです。

1.3 銀河と銀河間ガスの相関

銀河と銀河間HⅠガスの分布は、星形成銀河においてよく調べられています。我々も高精度の数値シミュレーションにおいて、銀河と銀河間ガスの分布がよく一致することを確認しています [7, 8, 11]。観測的には、遠方宇宙の一般的な星形成銀河であるライマンブレイク銀河 (Lyman-break galaxy; LBG) とLyαフォレストとの相互相関関数を用いて両者の分布の対応関係が確認されています (2.1節を参照, 例えば [12, 13])。

では、こうした先行研究の結果から、どのような種類の銀河の分布でも、銀河間ガスの分布と合っていると考えてよいのでしょうか? 遠方宇宙の探査では、LBGのみならず、様々な銀河種族を用いて大規模構造の推定やその中に存在する原始銀河団や高密度領域の位置特定が行われています。しかし、こうしたLBG以外の種族の銀河も銀河間ガスの密度分布と一致するかは不明です。そこで我々は、赤方偏移 $z=2^{*3}$ の宇宙を対象に、観測データを用いて、様々な種類の銀河について銀河と銀河間ガスの関係を調査しました [14, 15]。

2. 銀河種族による相互相関関数の多様性の調査

結果をお話する前に、本研究で用いた解析手法と観測データについて説明します。

2.1 相互相関関数の計算手法

我々の研究では、「相互相関関数」という手法

を用いて銀河と銀河間ガスの空間分布を定量的に評価しました。具体的には、銀河周囲のHⅠガスの密度を銀河からの距離の関数として求めています。ただし直接測定しているのは、ガス密度ではなくLyαフォレストの吸収量です。

本研究の相互相関関数は次の式で定義されます。

$$\xi_{\delta_F}(r) = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N(r)} \omega_{g,i}} \sum_{i=1}^{N(r)} \omega_{g,i} \delta_{g,i} - \frac{1}{\sum_{j=1}^{M(r)} \omega_{ran,j}} \sum_{j=1}^{M(r)} \omega_{ran,j} \delta_{ran,j}$$

ここで、 $\delta_{g,i}(\delta_{ran,j})$ は銀河 (ランダム点) から半径 r 離れた球殻内のLyαフォレストの吸収量を、 $\omega_{g,i}(\omega_{ran,j})$ は銀河 (ランダム点) から半径 r 離れた球殻内のLyαフォレストの測定誤差を意味しています。また、 δ_F (または δ) は宇宙平均に対するLyαフラックス F の超過 ($\delta_F = F/\langle F \rangle - 1$) を表し、 $\delta_F < 0$ ($\delta_F > 0$) はLyαフォレストの吸収が宇宙平均 ($\delta_F = 0$) より強い (弱い) ことを意味します。なお、上式により相互相関関数の信号が検出された場合、 ξ_{δ_F} は負の値をもちます。

銀河と銀河間ガス間の分布が一致する場合の相互相関関数はどのような形なのでしょう? そのヒントはLBGとLyαフォレストの相互相関関数にあります (図3灰色丸・四角点)。LBGの相関関数では、Lyαフォレストの吸収量が銀河から遠ざかるほど単調に弱くなっています。このように、ある銀河種族の相互相関関数がLBGのように単調に減少する信号を示せば、その銀河の分布は銀河間ガスの密度分布と一致していると推定できます。

2.2 銀河と銀河間ガスのデータ

次に、本研究で使用した観測データについて簡

*3 赤方偏移 $z=2$ は、宇宙誕生からまだ30億年程度の若い宇宙です。またこの赤方偏移は、銀河もLyαフォレストによる銀河間ガスも地上望遠鏡によって観測しやすい時代であるため、本研究の調査に適した時代でもあります。

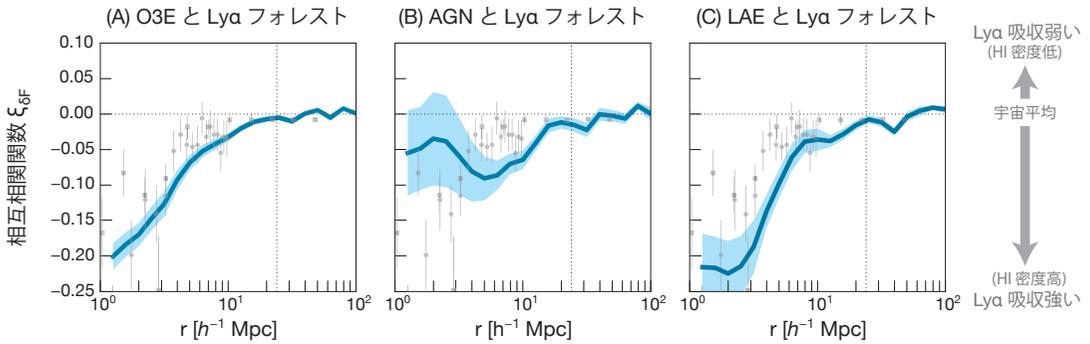


図3 (A) [OIII] 輝線天体, (B) 活動銀河核, (C) Ly α 輝線天体とLy α フォレストとの相互相関関数 (青線. 青帯は誤差). 灰色の丸および四角点は, 先行研究による LBG と Ly α フォレストの相互相関関数の結果を表しています ([12, 13]). Ly α フォレストの吸収の強さは, $\xi_{GF}=0$ (水平方向の点線) では宇宙平均を, そして $\xi_{GF}<0$ では宇宙平均より強いことを意味します ([14] の図を改変).

単にご紹介します. 銀河間ガスのデータは CLAMATO (COSMOS Lyman-Alpha Mapping And Tomography Observations) による Ly α トモグラフィのマップを用いました [9, 10]^{*4}. Ly α トモグラフィとは, 複数の背景天体のスペクトルから Ly α フォレストの吸収量を測定し, 銀河間ガスの密度分布を三次元的に再現するという手法です (図2-B). 我々が用いた CLAMATO は, COSMOS という観測領域内, 赤方偏移 $z=2-2.5$ における Ly α フォレストの吸収量の分布を三次元的に再現するという探索プロジェクトで, その探索体積は $3.15 \times 10^5 (h^{-1} \text{ Mpc})^3$ に及びます. この領域を, QSO に加え, QSO より個数密度が高い 200 天体以上の明るい星形成銀河をも背景光として用いることで, 天球面上の視線を埋めています. このように視線を十分に埋めることで, 再現されたトモグラフィマップは約 $2.5 h^{-1} \text{ Mpc}$ という高空間分解能を達成しています. 本研究を構想し始めた 2018 年当時, CLAMATO によるトモグラフィマップは公開データとして使用できる唯一のマップでした. ゆえに, この公開データがあったからこそ, 本研究が遂行できたと言っても過言ではな

いでしょう.

銀河間ガスのデータと同様に, 銀河のデータも基本的にはアーカイブデータを使用しています. 銀河と銀河間ガスの相互相関関数の測定には, 銀河の分光赤方偏移の情報が不可欠です. そこで我々は, アーカイブにある銀河の分光カタログを収集しました. 幸い, CLAMATO が探索した COSMOS 領域は様々な望遠鏡による深宇宙探索観測が行われた有名領域であり, アーカイブには多数の分光カタログが存在しています. こうした分光カタログをまとめた結果, 最終的に約 600 銀河の分光赤方偏移の測定値が得られました.

紙面の関係から, 本稿では, [OIII] 輝線天体, Ly α 輝線天体という二つの星形成銀河に活動銀河核を加えた, 合計三つの銀河種族の相互相関関数の結果をご紹介します. そして, 銀河と銀河間ガスの相関関係, さらにはこの二つの観測指標に反映される大規模構造をも加えた三者の関係を議論します. それでは, 三つの銀河種族の相互相関関数をそれぞれ見ていくことにしましょう.

*4 公開されているデータおよびプロジェクトの詳細はこちらをご覧ください [16].

3. [OIII] 輝線天体の相互相関関数

まず最初に、遠方の一般的な星形成銀河の一つであり、酸素の電離輝線 [OIII] で明るい [OIII] 輝線天体（以降、O3E）と銀河間ガスの相互相関関数をご紹介します。図3-Aの青線は、O3EとLy α フォレストの相互相関関数です。先行研究にて測定されているLBGの相互相関関数も同時に灰色の点で掲載しています。

O3Eの相互相関関数は、Ly α フォレストの吸収が銀河から離れるにつれて徐々に弱くなっています。この特徴は、我々のシミュレーションの星形成銀河や先行研究のLBGの相関関数の傾向と同じです。したがって、O3Eは銀河間ガスの密度分布と同様であり、両者は同じ大規模構造を正しくなぞっていると考えられます。

4. 活動銀河核の相互相関関数

次にご紹介する結果は、活動銀河核（AGN）の相互相関関数（図3-B）です。AGNとLy α フォレストの相互相関関数の特徴は、LBGやO3Eとは大きく異なる相関関数の形です。AGN周囲では、Ly α フォレストの吸収のピークが銀河直近ではなく $r=5-7 h^{-1} \text{ Mpc}$ に現れます。このピークを境に、銀河から離れる／近づくにつれてLy α フォレストの吸収は弱まります。

このような相互相関関数からは、AGNと銀河間ガスの空間的な対応関係について次の二つの状況が示唆されます。一つ目は、大局的な観点（ $\sim 5 h^{-1} \text{ Mpc}$ 以上でスムーズしたスケール）でのAGNの分布は銀河間ガスの密度分布に一致しているということです。なぜなら、 $r > 5 h^{-1} \text{ Mpc}$ では、LBGやO3Eのように、Ly α フォレストの吸収が単調に減少しているからです。

二つ目は、AGN周囲 $r < 5 h^{-1} \text{ Mpc}$ のH I ガス密度は低いということです。しかし、構造形成理論に基づけば、銀河間ガスの密度は銀河直近でも高くなるはずですが。

AGN直近のH I ガス密度が低いという結果は、「近接効果（AGNに近接する領域の銀河間ガスの多くが電離している）」という描像によって説明できます。近接効果とは、AGNから放射される強い電離光子が銀河周囲のH I ガスを電離する現象です。近接効果と言えばQSOが有名で、これまでの研究でもよく調べられています。たとえば、QSOの近接領域のサイズは、半径で約 $2-10 h^{-1} \text{ Mpc}$ 程度だと報告されています（例えば [17, 18]）。また、QSOとLy α フォレストの相互相関関数の測定でも、図3-Bのように吸収のピークが銀河から離れた場所に存在し、QSOの周囲約 $10 h^{-1} \text{ Mpc}$ にわたりH I ガス密度が減少している様子が報告されています [19]。こうした先行研究が示唆するQSOの近接領域は、本研究においてLy α フォレストの吸収が弱い範囲と同程度です。

AGNと銀河間ガスの相互相関関数から示唆された二つの状況から、AGNの分布は広域では銀河間ガスの密度分布に一致するものの、その直近の銀河間ガスの多くはAGNの近接効果によって電離されているため、局所的には、（中性の）銀河間ガスの密度分布と一致しない可能性があることがわかりました。つまり、AGNの周囲では、Ly α フォレストによる銀河間ガスの密度分布はダークマターの密度分布をトレースできていない場合があるのです。

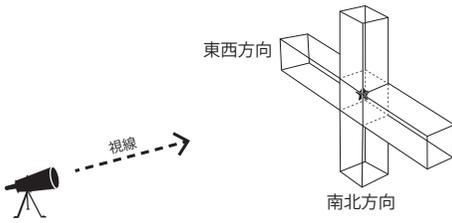
5. Ly α 輝線天体

最後に、水素のLy α 輝線で非常に明るく検出され、遠方宇宙に存在する星形成銀河の指標として最もよく用いられているLy α 輝線天体（LAE）の相互相関関数についてお話しします。

5.1 全方向の相互相関関数

図3-CのLAEの相互相関関数は、基本的に、Ly α フォレストの吸収が銀河から離れるにつれて弱くなっており、O3Eのものと似ています。しかし、大きな違いが一点あります。それは、 $r < 4 h^{-1} \text{ Mpc}$ で見られる平らな（一定の）吸収です。

A) 視線に垂直な二方向の解析



B) 視線方向の解析

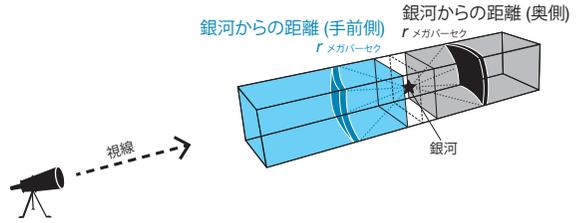


図4 “様々な観測視点による相互相関関数”の測定時に用いた視線方向のイメージ図。図のように、視線に垂直な二方向については東西方向を東側と西側に分けて、南北方向については南側と北側に分けて、また、視線方向については手前側と奥側に分けてLy α フォレストの吸収量を測定しています。望遠鏡は観測者の位置を表しています ([15, 20] の図を一部改変)。

図3-Cのような連続的な吸収を示す相関関数からは、二つの状況が示唆されます。一つ目は、大局的 (>4 h⁻¹ Mpc) にはLAEの分布は銀河間ガスの密度分布と合っているということです。そして二つ目は、LAEは銀河間ガスの高密度領域に付随せず、そこから3-4 h⁻¹ Mpc離れた地点に分布しているということです。なお、ここで意図する高密度領域とは、銀河団が存在しているような大規模構造中の高密度領域ではなく、例えば10 h⁻¹ Mpc程度の範囲において部分的に密度が高いような場所です。

では、なぜLAEは高密度領域を避けて分布しているのでしょうか？その原因はLAEの観測指標であるLy α 輝線にあります。一般に、Ly α 輝線はH α ガスによる吸収を受けやすいという特徴を有します。そのため、高密度領域にいるLAEから放射されたLy α 輝線は、銀河間空間のH α ガスに吸収されてしまい、私たちからは見えない、すなわち検出できなくなっていると考えられます。その結果、検出されたLAEだけを見ると、高密度領域を避けて分布しているように見えるのです。

5.2 様々な観測視点による相互相関関数

Ly α 輝線の吸収は視線方向で強く生じます。そのため、前述の我々の説が正しいとすれば、様々な観測視点でLAEと銀河間ガスの相互相関関数

を測定した場合、視線方向の相互相関関数にのみ、特有の異方向性が現れるはずですが、この動機の下、我々は、様々な観測視点からLAEとLy α フォレストの相互相関関数の再測定を行いました。

我々が調査した観測視点は大きく二つ—視線に垂直な方向と視線方向です (図4)。さらにそれぞれの方向を細かく場合分けしています。まず、視線に垂直な方向では銀河の周囲東西南北を (図4-A)、そして視線方向では銀河の手前側 (私たちに近い側, 図4-B青側) と奥側 (私たちから遠い側, 図4-B灰色側) に分けました。また、銀河間ガスとの分布が一致しているO3Eにも同じ解析を実行し、LAEの相関関数と比較しました。

では早速結果を見てみましょう。視線に垂直な方向 (図5-A) では、LAE・O3Eいずれも相互相関関数に異方向性は検出されていません。一方視線方向の相互相関関数 (図5-B) では、O3Eでは手前と奥側で差がないものの、LAEでは有意な差が確認できます。LAEの相互相関関数は $r=3-4 h^{-1} \text{ Mpc}$ (あるいは $r=20 h^{-1} \text{ Mpc}$) にわたり、手前側 (青色) のLy α フォレストの吸収が奥側 (黒色) より系統的に弱くなっており、手前側のH α ガス密度が奥側より低いことがわかります。相関関数の値 (ξ_{O3E}) から見積もられるLAEの手前と奥側のH α ガスの密度差は、2.1倍に及びます。

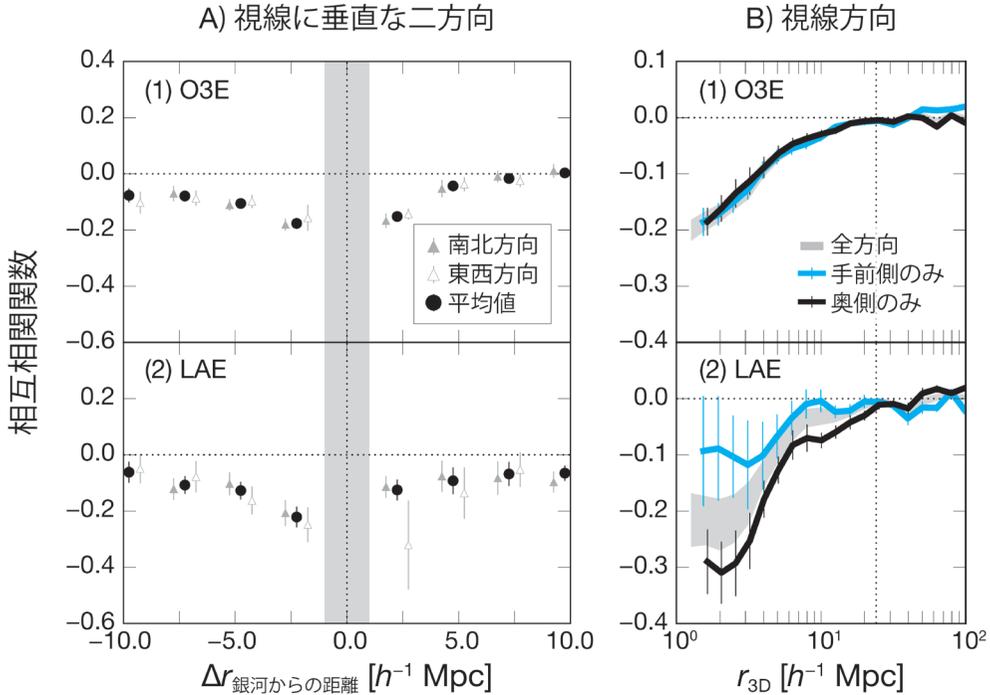


図5 (A) 視線に垂直な方向と(B) 視線方向の相互相関関数. (1)と(2)は [OIII] 輝線天体と Ly α 輝線天体の結果をそれぞれ表しています ([15] の図を改変). なお, (A) 中の灰色帯は, 視線に垂直な方向の相互相関関数の測定時に, 使用しなかったデータ範囲 (銀河直近 $-1 \leq \Delta r [h^{-1} \text{ Mpc}] \leq 1$) を意味しています ([15] の図を一部改変).

LAEの視線方向の相互相関関数から示唆される描像は, LAEは平均的に, ある高密度領域の $3-4 h^{-1} \text{ Mpc}$ 手前側に分布しているという状況です. この結果は, 5.1節で紹介した全方向の相互相関関数の結果と矛盾しません. 全方向の相関関数から示唆されたLAEの空間分布—LAEは銀河間ガスの高密度領域に付随せず, そこから $3-4 h^{-1} \text{ Mpc}$ 離れた地点に分布している—は, LAEが高密度領域の手前側に位置していることに起因していたわけです.

そして, LAEが高密度領域の手前側に存在している原因は, 5.1節の議論と同じく, LAEの観測指標である Ly α 輝線にあると考えられます. 高密度領域やそのすぐ後ろにいるLAEから放射されたLy α 輝線は, 銀河の手前に存在している銀河間ガス中のH I ガスに吸収され, 観測的に検出さ

れません. その結果, 私たちは, こうした領域にLAEが「存在している」とは認識できません. 一方で, 高密度領域の手前側に存在しているLAEから放射されたLy α 輝線は, 銀河間ガスの吸収を逃れ, 私たちに観測されます. こうして, 私たちから「見える」LAEだけの分布を銀河間ガスの密度分布と比較すると, LAEは高密度領域の手前側に偏った分布をしているように見えています. いるのに見えない…それはあたかも銀河が銀河間ガスで「かくれんぼ」をしているようでもあります. もし, 宇宙船に乗って, 今回観測した領域を別の視点から観測したとすると, 一部のLAEは見えなくなる一方, 代わりに別のLAEが見えてくるでしょう.

5.3 模擬LAEによる相互相関関数

ここで疑問が浮かびます. それは, 『高密度領

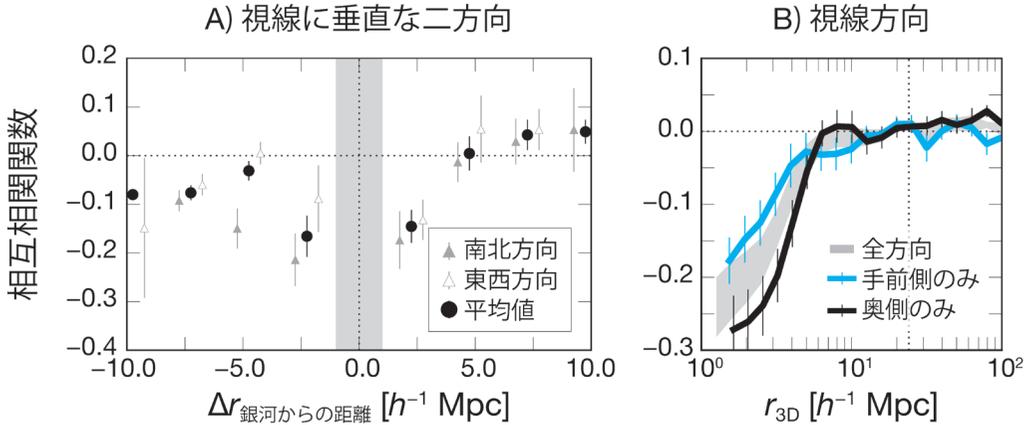


図6 [OIII] 輝線天体の一部から抽出された銀河（本稿では“模擬LAE”と呼んでいます）による（A）視線に垂直な方向と（B）視線方向の相互相関関数（[15]の図を改変）。（A）中の灰色帯は図5と同じ意味です。（B）LAEの結果（図5-B）とは異なり、模擬LAEの全方向の相互相関関数では平らな（一定の）吸収が見られません。模擬LAEと言えど、O3EのLy α 輝線の明るさはLAEと比べると暗いため、高密度領域からの相対的な位置は、LAEよりもO3Eのほうが小さく、相関関数には差が出づらい程度と考えられます（[15]の図を一部改変）。

域やそのすぐ後ろに本当にLAEはいるのだろうか？』ということです。しかし、「見えていない」銀河が「存在しうる」ことの証明は容易ではありません。しかし我々は、O3Eを用いてこの課題に挑戦しました。

O3Eを用いたこの追加解析では、『種族全体としては、その空間分布が銀河間ガスの密度分布と相関している銀河のうち、“実際のLAE選択の基準（ある一定以上のLy α 輝線の強度を有する）と同じ基準を満たしうる銀河（模擬LAE）”だけを用いて相互相関関数を測定した場合、図5のLAEの結果と同じく、視線方向の相関関数にのみ違いが生じるのか』を検証しました。3節で紹介したように、O3Eの分布は銀河間ガスの大規模な密度分布と一致しており、Ly α フォレストとの相互相関関数は観測視点によらないことが確認されています（図5-1）。このような性質を有するO3Eから抽出された模擬LAEの相互相関関数が、LAEの結果（図5-2）と同じ傾向を示したとします。その場合「銀河間ガスと同様に分布している銀河でも、その選択に条件をつけて抽出すると、局所的に銀河間ガスの分布とずれる」ことを示すこと

ができ、「真のLAEの分布は銀河間ガスの密度分布と一致する」ことが示唆できます。つまり、「見えていない」LAEの存在を間接的に証明できるのです。

図6に、異なる観測視点で得られた模擬LAEの相互相関関数を表示しています。得られた相互相関関数は、視線に垂直な方向も視線方向も、5.2節で紹介したLAEの相関関数と同じ傾向を示しています。視線に垂直な方向の相関関数では、少なくとも $r < 6 h^{-1}$ Mpc において視点毎の差は得られません。しかし視線方向では、 $r \leq 5 h^{-1}$ Mpc において、手前側のLy α フォレストの吸収が奥側よりも弱くなっています。我々はこの模擬LAEの結果から、高密度領域やそのすぐ後ろにいて「見えていない」LAEの存在を間接的に示すことができました。

図7は、本研究結果のイラストです。高密度領域の手前側に存在している銀河から放射されたLy α 輝線は私たちに届き、LAEとして検出されます。一方、高密度領域やそのすぐ奥側に存在する銀河から放射されたLy α 輝線は手前の銀河間ガスに吸収され私たちに届きません。なお、高密度領

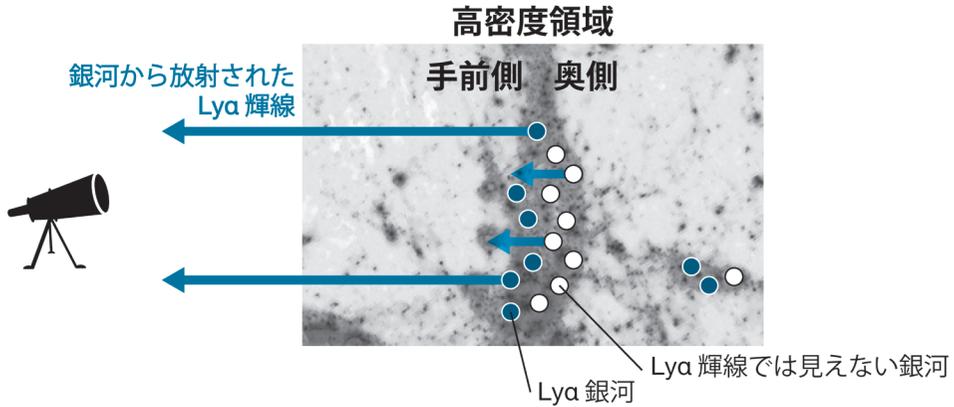


図7 我々の結果から示唆される銀河間ガス的高密度領域と銀河の分布の模式図. Ly α 輝線で見える銀河 (LAE) を青色で、見えない銀河を白色で表しています. 青矢印は銀河から放射されたLy α 輝線の伝播を表しています ([15, 20] の図を一部改変).

域のさらに奥側 (図の右端) に存在している銀河は再び検出できるようになります. これらの銀河から放射されたLy α 輝線が中央部の高密度領域に届く頃には、Ly α 輝線は本来の波長より十分長い波長に赤方偏移しており、銀河間ガスの吸収を受けずに済むからです. 高密度領域の内部かすぐ後ろ側の銀河だけが見えなくなるという点が本研究結果のポイントです.

5.4 LAEを指標とした大規模構造の評価

最後に、5.1-5.3節の結果をまとめ、LAEによる大規模構造の推定について議論します.

5.3節の模擬LAEの結果からは、LAEの真の空間分布は銀河間ガスの密度分布と一致することが示唆されました. 一方で、観測的に「見える」LAEは、銀河間ガス的高密度領域の手前側に偏った分布を有することが示唆されます (図7青丸). 高密度領域やそのすぐ後ろにいるLAEは、Ly α 輝線が銀河手前の銀河間ガスに吸収されるせいで、私たちには見えなくなっているのです.

“かんじんなことは、目には見えないんだよ” と、キツネが星の王子さまに言ったように [21],

LAEの分布では、肝心な真の物質分布が見えないのです.

このLAEの分布に関する結果から、LAEの空間分布は、周囲の広範囲のガスの影響を受けて銀河間ガスやひいてはダークマターという物質の分布を忠実に反映しえないことが指摘されます. もちろん、5.1節でも述べたように、大局的にはLAEの分布は大規模構造をなぞっているはずですが、しかし、局所的にはLAEから推定された大規模構造と真の構造に数 h^{-1} Mpcの差異が生じる可能性があります. 実際、先行研究では、LAEと他の星形成銀河種族で推定した高密度領域の位置に、数 $\sim 10 h^{-1}$ Mpc程度のずれがあるケースがすでに報告されています (例えば [22, 23]). では、LAEに代わり、どのような銀河種族であれば遠方宇宙の大規模構造をより忠実に推定できるのでしょうか? その候補は、LAE以外の遠方宇宙の星形成銀河であるLBGや、H α ^{*5}や酸素の電離輝線 ([OIII] や [OIII]) で明るい輝線天体です. 今後、昨年末に打ち上がったJWST (James Webb Space Telescope) やすばる望遠鏡/ULTIMATEにより、これらの

*5 H α 輝線はLy α 輝線と同じく水素原子の輝線ですが、H Iガスに吸収されません. そのため銀河から放射されたH α 輝線は、銀河間ガスに吸収されずに私たちに届きます.

銀河を用いた遠方宇宙の大規模構造の研究はさらに進んでいくと期待されます。

では、LAEは完全にお役御免なののでしょうか？いえ、そうではありません。Ly α 輝線は、地上望遠鏡を用いて広い赤方偏移 ($2 < z < 8$) にいる銀河の探査を可能とする便利な輝線です。そのため、LAEは遠方宇宙の大規模構造探査において重宝されています。そして今後も、遠方宇宙探査の一翼は間違いなくLAEが担うでしょう。我々の結果から示されたことは、LAEの指標であるLy α 輝線の性質をよく理解し、目的に応じて使用することの重要性です。今後は研究の目的に応じ、LAEだけではなく次世代の装置によって検出される他の星形成銀河種族も併用し、遠方宇宙の大規模構造の真の描像を解き明かしていく必要があるでしょう。

6. まとめと将来への展望

本稿では、三つの銀河種族において、銀河とLy α フォレストの相互相関関数を測定し、銀河-銀河間ガス-大規模構造という三者の三角関係を調査した結果を紹介しました。これらの結果から、

- 基本的には、銀河の分布も銀河間ガスの密度分布もダークマターの密度分布をなぞっている
- 輻射やガス放出によるエネルギーの放出（フィードバック）など銀河内での活動の影響で、銀河間H α ガスの密度分布は局所的 ($< 10 h^{-1} \text{ Mpc}$) に全銀河間ガスやダークマターの密度分布をなぞっていない場合がある
- 銀河探査に用いられる輝線の性質により、銀河の分布も局所的 (数 $h^{-1} \text{ Mpc}$) に銀河間H α ガス、そしてダークマターの密度分布をなぞっていない場合がある

ことが明らかとなりました。

本研究にて調査した「銀河と銀河間ガスの相関」は発展途上の研究分野です。そのため、銀河間ガスの密度分布を測定するLy α トモグラフィーは注目を集めています。すばる望遠鏡/PFS (Prime

Focus Spectrograph) による深宇宙探査においても主要な研究テーマの一つとなっていますし、TMT (Thirty Meter Telescope) のような次世代望遠鏡によるトモグラフィーの観測も考えられています [24]。特にTMTによる観測では、暗い銀河までトモグラフィーの背景天体として用いることができ、天球面上の視線を既存のトモグラフィーマップより密に埋めることが可能となります。その結果、銀河間ガスよりも銀河に近い距離に存在している銀河周辺ガスと銀河との相関関係の解明に迫ることができるのです。さらに、こうした銀河周辺のH α ガスの分布の詳細な調査によって、銀河からのフィードバックの物理に迫ることも期待されます。昨年発表された米国Astro2020でも、サイエンステーマの一つ「Cosmic Ecosystems」において、銀河周辺ガスや銀河間ガスの観測によるフィードバック機構の解明が重要な研究課題の一つとして言及されています [25]。このように、銀河と銀河間ガスの研究は今後益々盛んになると予想されます。我々は、観測データのみならず理論データも組み合わせ、銀河と銀河間ガス、さらに大規模構造の三者の関係の解明に貢献できるよう、今後も研究を進めていきます。

謝辞

本稿は、銀河と銀河間ガスに関する我々の一連の研究が基となっています ([8, 11, 14, 15])。興味を持たれた方は、併せてご覧いただくと幸いです。上記研究の中でも [15] は、2020年のコロナ禍で研究を開始し、論文投稿までこぎつけることができました。非日常の中でも、いつものように研究を進めることができたのは、共同研究者の方々のご助力と家族の支援と理解があってこそでした。この場をお借りして感謝申し上げます。またこの論文は、「かくれんぼ」をしている銀河の発見」としてプレスリリースもさせていただきました [20]。ご尽力いただいた東京大学理学部広報の方々にも深く感謝いたします。

本稿執筆に関し、共同研究者でもある嶋作一大様と長峯健太郎様、日下部晴香様、また高田昌広様からは有益なコメントをいただきました。加えて、編集委員の江草芙実様には執筆の機会そのものをいただきました。心より感謝いたします。

[25] <https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020> (2022.10.1)

参考文献

[1] Peebles, P. J. E., 1982, ApJ, 263, L1
 [2] Blumenthal, G. R., et al., 1984, Nature, 311, 517
 [3] Davis, M., et al., 1985, ApJ, 292, 371
 [4] Spergel, D. N., et al., 2003, ApJS, 148, 175
 [5] Tegmark, M., et al., 2004, Phys. Rev. D, 69, 103501
 [6] Planck Collaboration, et al., 2016, A&A, 594, A13
 [7] Shimizu, I., et al., 2019, MNRAS, 484, 2632
 [8] Nagamine, K., et al., 2021, ApJ, 914, 66
 [9] Lee, K.-G., et al., 2016, ApJ, 817, 160
 [10] Lee, K.-G., et al., 2018, ApJS, 237, 31
 [11] Momose, R., et al., 2021a, ApJ, 911, 98
 [12] Adelberger, K. L., et al., 2005, ApJ, 629, 636
 [13] Bielby, R. M., et al., 2017, MNRAS, 471, 2174
 [14] Momose, R., et al., 2021b, ApJ, 909, 117
 [15] Momose, R., et al., 2021c, ApJ, 912, L24
 [16] <https://clamato.lbl.gov> (2022.10.1)
 [17] D’Odorico, V., et al., 2008, MNRAS, 389, 1727
 [18] Uchiyama, H., et al., 2019, ApJ, 870, 45
 [19] Mukae, S., et al., 2020, ApJ, 896, 45
 [20] <https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2021/7356/> (2022.10.1)
 [21] サン＝テグジュペリ (訳: 内藤濯), 2017, 星の王子さま (岩波書店)
 [22] Shimakawa, R., et al., 2017, MNRAS, 468, L21
 [23] Shi, K., et al., 2019, ApJ, 879, 9
 [24] すばる+TMTサイエンスブック 2020

The Relation among the “Invisible” Large-Scale Structure and “Visible” Galaxies and Intergalactic Medium

Rieko MOMOSE

Carnegie Observatories, 813 Santa Barbara Street, Pasadena, CA 91101, USA

Abstract: The most prominent structure in the Universe is the density distribution of the dark matter, called the large-scale structure (LSS). Observational probes of the LSS at higher redshift ($z \geq 2$) are galaxies and the intergalactic medium (IGM) traced by Ly α forest absorptions. Nonetheless, in reality, we can only detect a part of galaxies or the IGM in the Universe due to observational restrictions. Thus, it is actually unclear whether we truly trace the LSS from a limited galaxy or IGM data. Besides, it is uncertain whether both galaxies and the IGM faithfully follow the underlying dark matter distribution. We are investigating these topics with observations and numerical simulations. Here I introduce our latest results obtained from observational data and discuss the complex relation among galaxies, the IGM, and the LSS.