

DLA と銀河形成

長 峯 健太郎

〈カリフォルニア大学サンディエゴ校

Center for Astrophysics and Space Sciences, MC 0424, 9500 Gilman Dr., La Jolla, CA 92093-0424, U.S.A.〉

e-mail: knagamine@ucsd.edu

Damped Lyman- α System (DLA) は、高赤方偏移における銀河形成の研究に非常に役立つ手がかりである。本稿では、星形成とフィードバックを取り扱った宇宙論的流体シミュレーションを用いた DLA 研究を紹介する。特に、DLA 断面積と DLA 発生分布関数へのフィードバックの効果に焦点を当て、DLA ハローの平均質量から DLA と Lyman-break 銀河との相関を示唆する。

1. はじめに

現代宇宙論の主要な目的の一つは、初期宇宙から現在に至るまでの大規模構造および銀河の形成と進化を解き明かすことにある。1900 年代後半から現在に至るまでのさまざまな観測データにより、宇宙の物質密度やハッブル定数などの宇宙論パラメーターは、すでに 10% 以内の精度で値が求まっている。宇宙背景放射揺らぎ、超新星への距離、そして銀河団の個数密度などの観測結果を組み合わせた解析によると、われわれの宇宙は平らであり、全エネルギー密度の約 70% が真空エネルギー（アインシュタインの宇宙項, Λ ）、そして残りの約 30% が物質密度で占められている¹⁾⁻³⁾。さらに、宇宙の大規模構造形成は宇宙初期に cold dark mater (CDM^{4), 5)}; 暗黒物質) に植え付けられた微小な密度揺らぎが重力によって成長してできあがったとされ（いわゆる Λ CDM モデル）、非常によく理解されつつある。CDM は宇宙の物質密度のうち 90% を占め、バリオン（ガス）は残りのたった 10% に過ぎない。宇宙の大規模構造が大略理解された現在、いまや最先端の研究は「いつ、どのように」銀河が形成されてきたのか、という点に急速に焦点が移ってきている。本

稿で紹介する DLA は、まだ年齢が若い宇宙の中でどのように銀河形成が進行し、ガスが星に変わっていったかという点を宇宙論的見地から研究するうえで、重要な手がかりの一つである。ここでは筆者がこの数年間、宇宙論的流体シミュレーションを用いて行ってきた DLA に関する研究を紹介したい。

2. DLA とは？

DLA とは、クエーサー吸収線系の一つで、中性水素の柱密度が $N_{\text{HI}} = 2 \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$ よりも大きいものである。この定義は半ば歴史的なもので⁶⁾、星形成が静かに進行している銀河ディスクの N_{HI} にほぼ相当する。そのため、DLA が観測される high- z 銀河においては星形成が起きていることが期待される。図 1 にクエーサーのスペクトルと DLA の典型的な例が示されている。Lyman- α の吸収線は静止系波長 1,216 Å で起きるので、DLA が観測される波長から吸収線を引き起こしている中性水素ガスの存在する赤方偏移が読み取れる。

これまでの研究から^{7), 8)}、DLA は high- z 宇宙における中性水素密度の多くを占めることがわかっている。これら high- z の中性ガスは、いずれ星に変わるものと考えられるので、DLA は星形成の

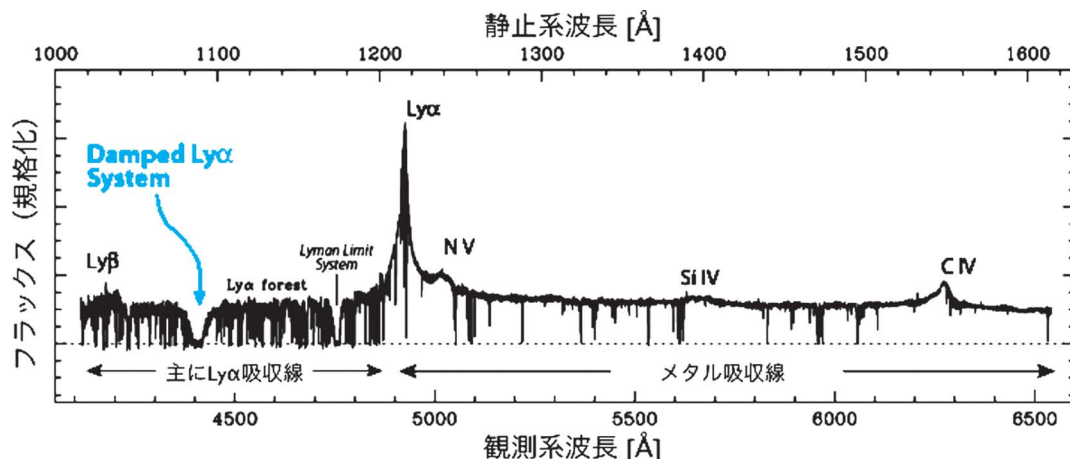


図1 Keck 望遠鏡のエッセル分光器 (HIRES) を用いて、カリフォルニア大学サンディゴ校 (UCSD) グループによって観測された $z \sim 3$ のクエーサースペクトル。観測系波長から赤方偏移 $z \sim 2.6$ に DLA があることがわかる。

ための中性ガス貯蔵庫のようなものである。その観測方法は吸収線によるので、可視光・赤外線によるダイレクトな輝線による銀河観測と相補的なものと考えられる。つまり、DLA は（星ではなく）ガスがどのように $high-z$ 銀河で振舞っているかを教えてくれるのである。

ところが、では DLA を保有するのは一体どのような銀河なのか、という点についてはいまだに不明なことが多い。観測的には、DLA と同じ赤方偏移にある銀河を光学・分光的に同定してその性質を調べるのが最も直接的でわかりやすいのだが、多くの DLA が $high-z$ にあり、対応する銀河（以下、DLA 銀河と呼ぶ）がとても暗いため、地上からの観測では同定が非常に難しい。しかも明るいクエーサーへの視線方向近傍で探さなくてはならないため、暗い DLA 銀河は尚更観測しにくい。また、比較的低い赤方偏移の DLA 銀河観測はいくつか存在するが⁹⁾、同定された銀河サンプルは矮小銀河から円盤銀河まで幅広い形態を含み、DLA 銀河についてははっきりとした描写は浮かんでこない。

一方、観測される DLA に対するメタルの吸収線幅は、時に 100–200 km/s にもなるため、80 年

代から 90 年代半ばまで、DLA は主に円盤銀河のディスク部分に起因すると考えられてきた。しかし、この解釈が現在の構造形成の標準理論と両立するのかどうかは、現在盛んに議論されている。

3. Hydrodynamic Cosmology と DLA

構造・銀河形成は、暗黒物質の重力に支配された複雑かつ非線形なプロセスであるので、初期からの進化を系統立てて理解するには、大規模な N 体+流体力学的シミュレーションを行うのが理想的である。それを実行するのが“Hydrodynamic Cosmology”という分野である。インフレーション理論に基づいた密度揺らぎからスタートし、それ以後の構造形成を重力と流体力学の法則を用いてスーパーコンピューターで計算するのである。このような宇宙論的スケールで構造形成の数値計算を行い、実際の天文観測データと比較することは、観測データを宇宙論的な枠組みで理解すると同時に、構造・銀河形成モデルをテストするうえで必要不可欠な研究である。モデルによる予想なくしては、観測データを理解することができないばかりか、銀河形成理論をより確かなものに洗練していくこともできない。つまり、理論と観測を

結びつける「橋」が必要なのであり，“Hydrodynamic Cosmology”はその役割を担う分野といえる。

構造形成の標準モデルと見なされる Λ CDM モデルにおいては、小さい質量の物体（暗黒物質ハロー）がまず始めに形成され、その後これら小さいものが合体して大きな質量のものがしだいに「階層的に」できあがっていったとされている。そして、ハローによって形成されたポテンシャル井戸にガスが落ち込み、放射冷却により収縮して初期銀河ができあがると考えられている。この CDM モデルの見地からすれば、high- z の DLA は静かに成長を続けている円盤銀河のディスクというよりも、銀河をまさに形成しようとして集合してきたガスの「塊」に起因するという解釈のほうが自然であるかもしれない。実際、そのような解釈で DLA に対応するメタルの吸収線の形が説明できるとする報告もある¹⁰⁾。

銀河形成を系統的に理解するうえで、もう一つ複雑な問題点がある。上に説明したように、初期銀河内でいったん星の形成が始まると超新星爆発が起これ、その爆発エネルギーによって周囲のガスが熱せられて、次世代の星形成が抑制される。これを「フィードバック効果」という。この現象は、重金属を銀河間空間に運ぶという重要な役割をも担っている¹¹⁾。フィードバックを伴う銀河形成シナリオの後半部分はいまだによく理解されておらず、DLA はフィードバックを研究するうえでも有効な手段である。

4. 研究結果

筆者らは数年前から宇宙論的流体シミュレーションを用いて、DLA の性質を研究している。われわれのシミュレーションでは、星形成とフィードバックを現象論的なモデルで取り扱っている^{12), 13)}。計算の各タイムステップで、高質量密度領域にガスが流入して急速に放射冷却している場合に、その冷却率に応じて一部のガスを星粒子

に替え、さらに形成された星粒子の質量に応じて超新星爆発のエネルギーを周囲のガスに与えるのである。また、スターバースト銀河に観測されているような銀河風をモデルするために、一部のエネルギーはガスの運動エネルギーとしても分配される。この銀河風フィードバックによってガスがハローから放出され、重金属も同時に銀河間空間へ運ばれる。表紙図に、われわれのシミュレーションからあるハローの例を示す。

4.1 中性水素ガス質量密度と柱密度関数

シミュレーション内の中性水素ガス質量をすべて足し合わせて体積で割ると、図2に示すようにその宇宙全体的の質量密度が計算できる。星形成

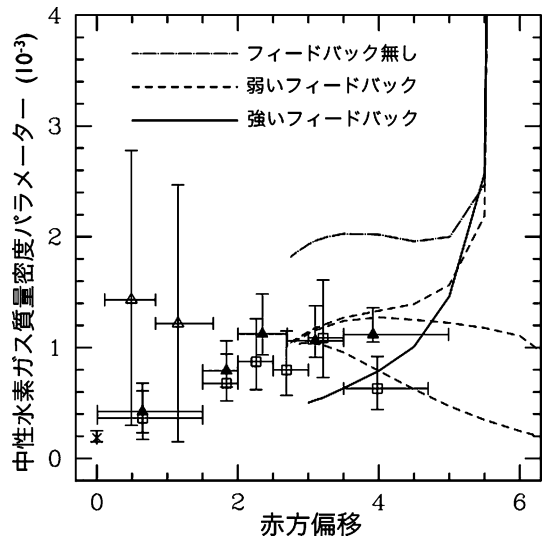


図2 中性水素ガスの質量密度を宇宙の平均密度で割った量（質量密度パラメーター）が赤方偏移の関数として示されている¹⁵⁾。観測データも示されている。これらのシミュレーションでは、 $z \sim 6$ に宇宙の再電離をモデルするために一様紫外線場が導入されるため、 $z=5-6$ の間に急速に中性ガス密度が減少する。弱いフィードバックの場合については、下方二つの線で宇宙の平均密度よりも1千倍と1万倍の高質量密度をもつハロー内のガスのみに限った量も示している。これら二つの線は、ハロー内でしだいに中性ガス密度が上がっていく様子を示している。

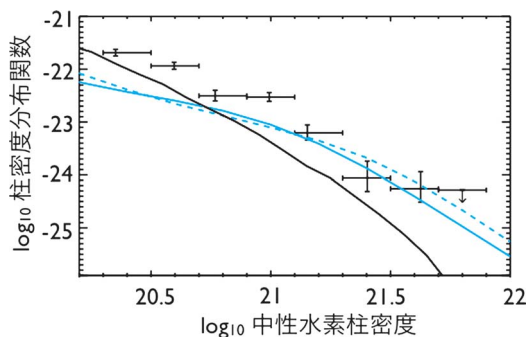


図3 赤方偏移 $z=3$ における中性水素柱密度の分布関数。最新のデータ¹⁶⁾とともに三つのモデルの結果が示されている。傾きが小さい青の点線と実線がサイズの異なる宇宙論的シミュレーション¹⁵⁾から、傾きが急な黒の実線は別の semi-analytic モデル¹⁷⁾からのものである。

からのフィードバックが全くないと、より多くのガスが放射冷却によって冷えるので中性ガス密度が最も大きくなる。フィードバックが強くなればなるほど、その量は減っていく。これらのシミュレーションは、 $(10 \text{ メガパーセク})^3$ の体積のものであるため、 $z \sim 3$ で止められている。観測データも示されているが、 $z \sim 3$ 辺りが最もサンプルが大きく信頼できる。赤方偏移 $z \sim 1-2$ の領域ではいまだにサンプルが少なく、エラーバーが大きい。

表紙図に示したようにシミュレーション内のすべてのハローについて中性水素柱密度を計算し、与えられた柱密度がどのくらい頻繁に観測されるかを調べると、図3に示す柱密度関数が得られる。われわれのシミュレーションの結果は、柱密度が大きい部分ではデータとよく一致するが、柱密度が小さい部分ではデータよりも低めである。超新星爆発によるフィードバックが全くないと、柱密度が高い視線数が過剰になってしまう。全く別のアプローチをとった semi-analytic モデル¹⁵⁾の結果も示されているが、観測データに合うモデルを構築するのが簡単ではないことがわかる。

4.2 DLA 断面積とフィードバックの効果

DLA の分布の解析方法として、その断面積をハロー質量の関数として見ることも有用である。

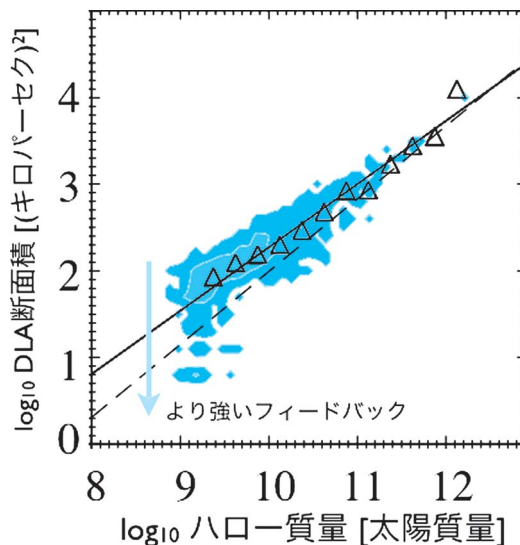


図4 DLA 断面積とハロー質量の分布図。この図の各点は、一つ一つのハローに対応するが、分布は等高線を使って表されている。三角の点は、横軸各目盛りでの中央値を示し、線形回帰をこの点に対して行うと直線が得られる。

図4に示すように、両者にはほぼ線形な比例関係があるのだが、フィードバックが強くなればなるほど、星形成からのエネルギーフィードバックによって中性水素ガスの質量が減り、小さい質量のハローの DLA 断面積が減少する(矢印参照)。

この両者の関係を図4に示されているように直線で近似し、ハローの質量分布関数とのたたみ込みを計算すると、DLA 発生率の分布関数をハロー質量の関数として見る事ができる¹⁸⁾。その結果が図5に示されている。フィードバックが強くなるにつれて小質量ハローの DLA 断面積が減少し、DLA 発生率への寄与が小さくなっていき、 \times (バツ) で示された分布の中央値はしだいに大きい質量側へとずれていく。ところが、発生率分布でウェイトをかけた DLA の平均ハロー質量は、どの分布においても大体 10^{12} 太陽質量程度である。特に、フィードバックが最も強い場合には、分布にはっきりとしたピークが現れる。このピー

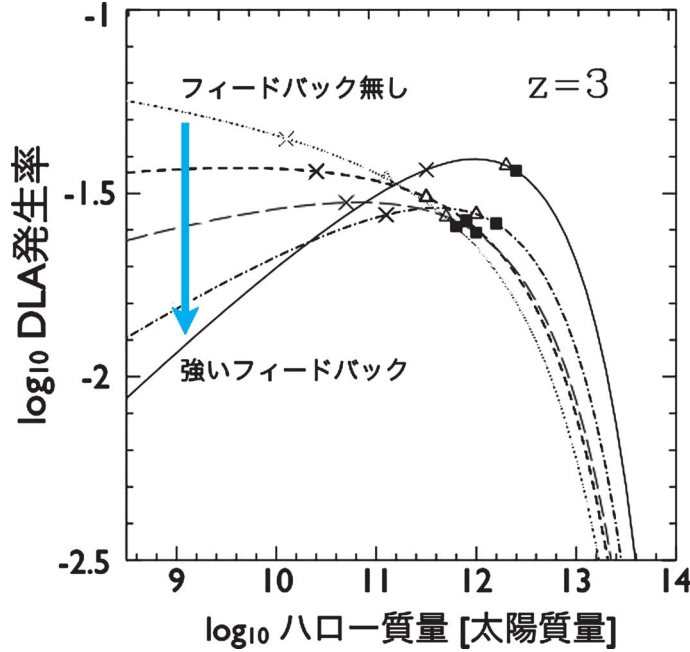


図5 DLA 発生率の分布関数がハロー質量の関数として表されている。× (バツ) は分布の中央値, 三角は 75% 値, 四角は発生率分布でウェイトをかけた DLA の平均ハロー質量である。

クに近い DLA ハローの平均質量は、 $z \sim 3$ で非常に多くの観測がなされている Lyman-break 銀河 (LBG) の典型的なハロー質量に対応する。この結果は、DLA と LBG の強い相関関係を示唆しており、非常に興味深い。実際、最近になって両者の間に強い相関を示す観測データの解析結果が UCSD のグループによって発表された¹⁹⁾。DLA と LBG の相互関係については理論・観測ともにこれから盛んに研究がなされていくと思われる。

5. 将来の展望

この 20 年間、DLA について理論・観測ともに精力的に研究がなされてきたが、その物理的性質についてのわれわれの理解はまだ十分とはいえない。DLA 銀河の性質をよりよく理解するには、吸収線以外の方法でアプローチすることも必要と考えられる。その一つの可能性として、筆者らは最近、初期 DLA 銀河からの [CII] 輝線の観測可能性について議論した²⁰⁾。この輝線は、静止系波長

158 ミクロン (1,897 GHz) であり、天の川銀河のような円盤銀河の主要な放射冷却剤と考えられている。赤方偏移 $z=3$ の DLA 銀河からの放射であれば、地上の観測系では 0.6 ミリ (474 GHz) に赤方偏移するため、観測するためにはサブミリ波望遠鏡が必要となる。われわれの宇宙論的流体シミュレーションを利用した計算では、とても明るい Lyman-break 銀河でも 1 mJy 程度の [CII] フラックスと見積もった。そのため、将来の Atacama Large Millimeter Array (ALMA) と、日本の赤外宇宙望遠鏡 SPICA での観測が最も成功可能性があると考えられる。特に、上記の観測系周波数は ALMA において日本が開発を担当している受信機で観測可能であるため ALMA-J グループの活躍が期待される。また、[CII] 輝線はダストの量が多いほど強くなると考えられるため、観測対象としては明るい LBG だけでなく、ダストの量がより多く星形成が盛んな BzK 銀河²¹⁾ も含めたほうがよいと思われる。

シミュレーション面では、いまだに星形成・フィードバック・放射輸送を同時に取り扱った大規模な宇宙論的シミュレーションが実現していない。現在は、主にコンピューターの速度に制約されているが、今後技術の進歩とともに、上記のようなシミュレーションも徐々に可能になると考えられる。

謝 辞

本研究の共同研究者である Lars Hernquist, Volker Springel, Art Wolfe に感謝いたします。また、本稿執筆の機会を与えてくださった編集委員の今西昌俊様に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Ostriker J. P., Steinhardt P., 1995, Nature 377, 600
- 2) Bahcall N., et al., 1999, Science 284, 1481
- 3) Spergel D. N., et al., 2003, ApJS 148, 175
- 4) Blumenthal G. R., et al., 1984, Nature 311, 517
- 5) Davis M., et al., 1985, ApJ 292, 371
- 6) Wolfe A. M., et al., 1986, ApJS 61, 249
- 7) Lanzetta K. M., Wolfe A. M., Turnshek D. A., 1995 ApJ 440, 435
- 8) Storrie-Lombardi L. J., Wolfe A. M., 2000, ApJ 543, 552
- 9) Chen H.-W., Lanzetta K. M., 2003, ApJ 597, 706
- 10) Haehnelt M., Steinmetz M., Rauch M., 1998, ApJ 495, 6471
- 11) Cen R., Nagamine K., Ostriker J. P., 2005, ApJ, 635, 86
- 12) Springel V., Hernquist L., 2003, MNRAS 339, 289
- 13) Springel V., Hernquist L., 2003, MNRAS 339, 312
- 14) Nagamine K., Springel V., Hernquist L., 2004, MNRAS 348, 435
- 15) Nagamine K., Springel V., Hernquist L., 2004, MNRAS 348, 421
- 16) Prochaska J. X., Herbert-Fort S., Wolfe A. M., 2005, ApJ 635, 123
- 17) Maller A., et al., 2001, ApJ 326, 1475
- 18) Nagamine K., Wolfe A. M., et al., 2005, ApJ, submitted (astro-ph/0510729)
- 19) Cooke J., et al., 2006, ApJ 636, L9
- 20) Nagamine K., Wolfe A. M., et al., 2006, ApJ, submitted (astro-ph/0601155)
- 21) Daddi E., et al., 2004, ApJ 617, 746

Damped Lyman- α Systems and Galaxy Formation

Kentaro NAGAMINE

*Center for Astrophysics and Space Sciences,
University of California at San Diego, MC 0424,
9500 Gilman Dr., La Jolla, CA 92093-0424,
U.S.A.*

Abstract: Damped Lyman- α Systems (DLAs) are very useful probes of high-redshift galaxy formation. They contain wealth of information, including gas and metal distribution in high-redshift galaxies and on the strength of feedback. Here we describe our research on the properties of DLAs using cosmological hydrodynamic simulations which include treatments of star formation and feedback, focusing on the effects of feedback on DLA cross-section and DLA distribution as a function of halo mass. We also suggest the correlation between DLAs and LBGs from DLA mean halo mass.