

宇宙の大規模構造と銀河形成

長峯 健太郎

大阪大学 大学院理学研究科 宇宙地球科学専攻

1. はじめに

観測的宇宙論はこの 20 年間に爆発的進展を遂げ、いわゆる「精密宇宙論」と呼ばれる時代に突入した。1990 年代半ばに NASA が打ち上げた COBE、その後 21 世紀に入ってから WMAP、Planck などの衛星計画によって宇宙背景放射の精密な観測が行われ、超新星への距離などの他の観測とも組み合わせることによって、宇宙論パラメータが 10% 以内の精度で決まった。その結果、ダークマターとダークエネルギーに支配された Λ cold dark matter (Λ CDM) モデルが現在の標準宇宙モデルとなった (図 1 参照)。

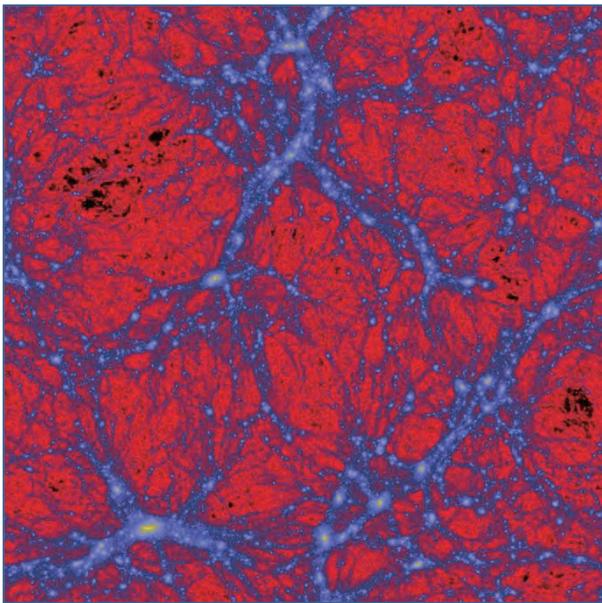


図 1 現在の宇宙における大規模構造 (縦横約 400 万光年の大きさ)。この図は N 体シミュレーションの結果で、宇宙のダークマター分布を示している。青で示されている部分がダークマターが集まったフィラメントやダークマターハローを示し、黒や赤で示されているのが低密度なボイドと呼ばれる領域である。

一方で、ダークマター自身は光を発しないので、光による直接観測は今の所できない。我々は宇宙において光るもの (すなわち星や銀河) もしくは吸収するものを間接的に観測し、宇宙全体のことを学んでいる。つまりバリオンの世界である。その銀河の

統計量である銀河光度関数の宇宙論的進化などは未だに完全には理解されていない。今後 10 年間の研究は精密宇宙論をベースに、宇宙の構造形成をより正確に把握していく『精密構造形成論』へ向かって行こう。

具体的には、ダークマター、ガス、星、メタル、ダストなどがこの宇宙の時空間にどのように分布しているのかを正確に把握するというミッションである。(天文学においてはヘリウムよりも重い重金属をメタルと総称する。) ダークマターとガス (バリオン) 分布に関しては、80-90 年代にすでに一定の研究の進展があり、宇宙論的シミュレーションと観測計画が手を携えて、宇宙における物質分布の理解が深まってきた。それは、銀河の 2 点相関関数や Lyman- α forest (以後 LAF) と呼ばれるクエーサー吸収線系の統計的解析によって行われ、銀河間物質 (Intergalactic medium; IGM) がシミュレーション内に見られるようにフィラメント状 (cosmic web) に分布していることが示唆されてきた (図 2 参照)。

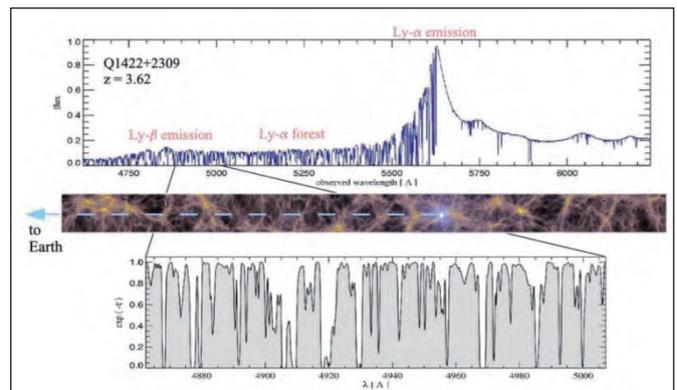


図 2 赤方偏移 $z=3.62$ にあるクエーサー (早期宇宙における巨大ブラックホール) からの光が IGM に含まれる中性水素によって一部吸収されることにより、そのスペクトル (上段) に LAF (下段) 吸収線が生じる様子を示している。中段は宇宙論的流体シミュレーション内のガス分布 (Springel et al. 2006)。

2. 宇宙における中性水素の分布と IGM Tomography

21世紀に入ると、Sloan Digital Sky Survey などの大規模サーベイにより中性水素(H_I) 柱密度が高い吸収線系の大規模サンプルが手に入り、銀河と IGM の相互作用や金属分布が研究の焦点となっていた。これらの先行研究により、深い吸収線に対応するガスが高赤方偏移の円盤銀河やその周辺にあるガスに対応していて、金属吸収線は超新星爆発や巨大ブラックホールによってメタルが吹き飛ばされる feedback 過程について重要な情報を与えてくれることがわかってきた。こうした吸収線系から得られる情報は星形成とは独立なため、銀河の光度に頼った観測に比べて無バイアスであるという大きなメリットもある。

また最近では、キューサーよりも高密度に天球面上に分布する高赤方偏移の星形成銀河を背景光源として、影絵のように IGM の空間分布を トモグラフィ (Ly- α 吸収線を利用)によって調べることが可能になってきている(図 3 参照)。すばる望遠鏡では、現在 SUMIRE プロジェクトの初段階の HSC 撮像サーベイが進行しているが、次に多天体分光装置 PFS が 2019 年頃から稼働し、その広視野・高分解能を活かした大規模 IGM tomography 観測が始まる予定である。この世界に先駆けた tomography 観測データを宇宙論的に解釈するためには、宇宙論的シミュレーションによる理論モデルが不可欠であり、それは PFS の主要観測パラメータ(背景光源数や観測時間数など)を決定するためにも重要な役割を果たす。

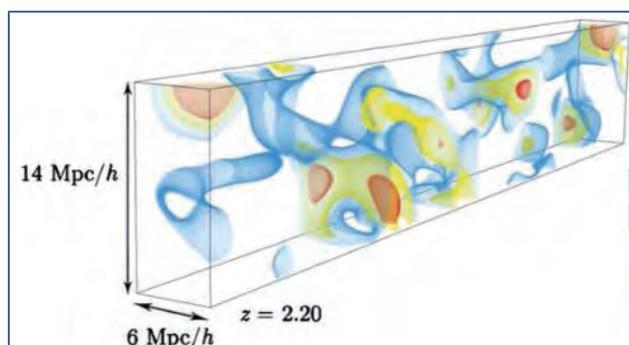


図 3 IGM tomography 観測の一例。24 個の銀河スペクトルを用いて、吸収線の深さに応じて見積もられた $z \sim 2$ の IGM の等密度面 (Lee et al. 2014)。

3. 大規模並列宇宙論的流体計算 (3D)

観測データを宇宙論的な視点から解釈する上で、我々の研究グループが実行する大規模宇宙論的流体シミュレーションは不可欠なものである。我々は、すばる望遠鏡の IGM tomography 観測に対応する理論的予測を行い、『精密構造形成論』に先鞭をつけようとしている。そのために銀河形成モデルを含む宇宙論的流体シミュレーションを実行し、宇宙における全物質の 3 次元分布を時系列で追っている。

我々の研究グループでは Gadget-3 (Springel 2005) という宇宙論的 N-body/SPH コードに、星形成や超新星 feedback に関する物理的モデルを付加した改訂版を作成した。シミュレーションの粒子数としてはガスとダークマターでそれぞれ 2×256^3 , 2×512^3 のものを走らせている(ガスとダークマターがそれぞれ 256^3 , 512^3 粒子ずつあるので、 $\times 2$ となる)。 512^3 粒子数の場合、一つの snapshot が約 20GB で、約 20 snapshot を一つのランでアウトプットする。

高密度領域ではガスがダークマターのポテンシャル井戸に落ち込み、放射冷却によって冷えると銀河形成が始まり、徐々にガスから星が生成される。シミュレーションの中ではその過程を subgrid モデルとしてモデル化しており、条件を満たした場合にガス粒子を徐々に星粒子に変換していく。生成した個々の星粒子にはその質量、形成時期、金属量などがタグとして記録されている。また星から放出される輻射が宇宙空間を満たして宇宙背景紫外線場が生成されることが知られているが、これも空間的に一様なモデル(Haardt & Madau 2012)を適用している。この宇宙背景紫外線場が銀河間物質(Intergalactic Medium; IGM)との輻射電離平衡に達し、ある温度と密度の比例関係 ($T \propto \rho^{\gamma}$) を生む。

宇宙論的シミュレーションといえども、広大な宇宙空間に比べると体積はまだ小さく、観測と比較するためにはシミュレーションの箱をいくつも繋げて light-cone output を作成しなくてはならない。そしてその light cone に何本も視線(Line-of-sight; LOS)を打ち、LAF プロファイルを計算する。図 4 に LOS の具体的な結果の一例を示す。ここではガスの

固有運動によって H_I column density プロファイルと吸収線の位置が微妙にシフトしていることが見て取れる。シミュレーションからは本来ここに示しているよりもより高解像度の吸収線プロファイルが得られるのだが、ここでは実際の PFS 観測の解像度にならざるを得ずとして計算結果を示しているの、下段 3 つのパネルでは吸収線プロファイルがかなり荒く見えている。

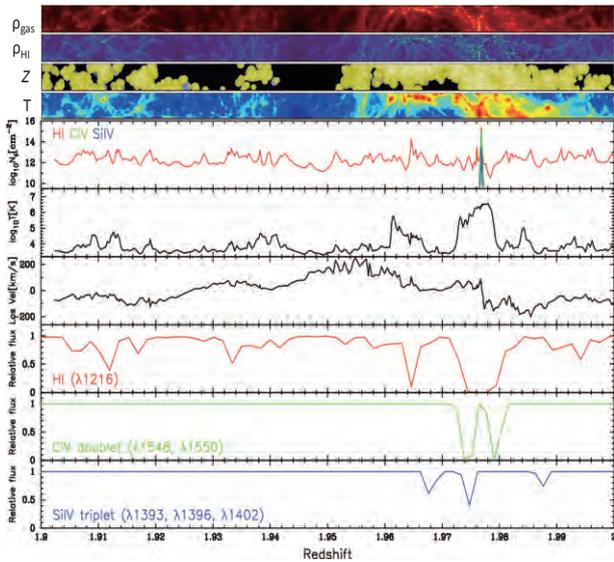


図 4 シミュレーションに実際に打った一本の視線(LOS)から得たデータ。上 4 つの小さなカラーパネルは上からガス密度、中性水素(H_I)、金属量(metallicity)、温度をシミュレーションから切り取ったもの。その下から H_I column density、温度、ガスの固有速度、LAF 吸収線、 CIV 吸収線、 $Si IV$ 吸収線のプロファイルを $z=1.9-2.0$ の赤方偏移区間について示している。

4. その他の初期結果

4.1 Ly- α forest パワースペクトル

既に図 2 と図 4 で紹介した LAF をシミュレーションから計算して統計的に解釈するためには、LOS 方向の 1 次元パワースペクトルを用いる。図 5 にシミュレーションから計算した 1D LAF パワースペクトルを観測データと比較したものを示す。宇宙論においては、視線方向の距離は宇宙膨張を含む速度空間で表現されることが多いので、ここでは横軸は速度波数空間($\propto v^{-1}$ [$s \text{ km}^{-1}$])になっている。低い k の値、即ち large scale 側では概ねシミュレーションと観測データが一致しているが、高い k (small scale)側ではシミュレーションの結果の方が低く出る傾向があ

り、今後さらにその原因を精査していく必要がある。現在の解析によると $P(k)$ を計算する際の速度幅に low- k 側が影響されることがわかっており、観測とのさらなる詳細のすり合わせが必要である。

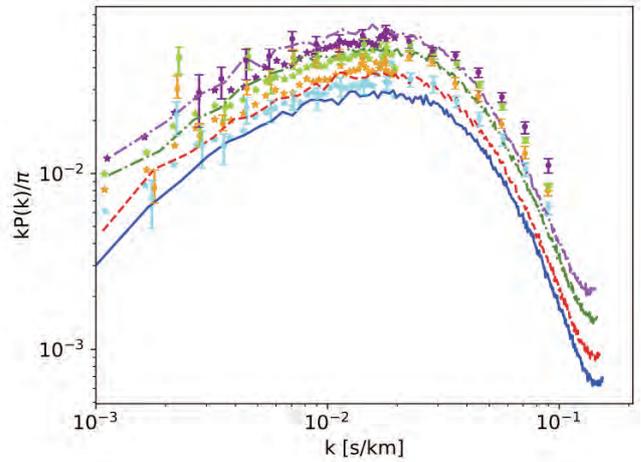


図 5 シミュレーションから計算した LAF の 1D パワースペクトルを観測データと比較したもの。4 本の曲線はそれぞれ上から下に赤方偏移 $z=2.8, 2.6, 2.4, 2.2$ に対応するもので、赤方偏移進化も含めて大まかにシミュレーションで再現できていることがわかる。

4.2 銀河周辺の中性水素ガス分布

銀河の周辺に中性水素がどのように分布しているのかという点は 10 年以上前から議論されてきている課題である。ダークマターハローのポテンシャルの中にガスが落ち込めば密度が高くなり放射冷却率も高くなるので、水素の中性度も上がると考えられる。しかし、同時に断熱圧縮や Virial shock によりガスが加熱される。また、中心の銀河で星形成が活発に起きれば、超新星爆発によるフィードバックや電離光子も銀河から吹き出てくる。これらの幾つもの効果が同時に働くので、一概に中性度が上がるのか下がるのか分からないところがある。シミュレーションではこれらの物理過程をできるだけ物理的に ab initio に解こうというわけである。

図 6 に数多くの LOS データから銀河との距離 (impact parameter “ b ”) に応じて、水素の中性度を「平均化した吸収の度合い」から測ったものを示す。まず全体的に銀河に近づくほど吸収度が高くなり、中性度が上がっている様子が見て取れる。Impact parameter $b > 1 \text{ cMpc/h}$ においては シミュレーショ

ンの結果と観測データはよく合っており、 $b < 1$ cMpc/h の small scale においては平均を計算するときの銀河からの速度幅の取り方に結果が影響されることがよくわかる（4本の線）。観測データもそのバラツキの範囲内に含まれている。このように $b > 1$ cMpc/h の大スケール側でデータとよく一致することは現在の標準宇宙モデルである Λ CDM モデルをサポートするものであり、 $b < 1$ cMpc/h の小スケール側のデータはフィードバックなどの物理に制限をつけるのに役立つと期待される。

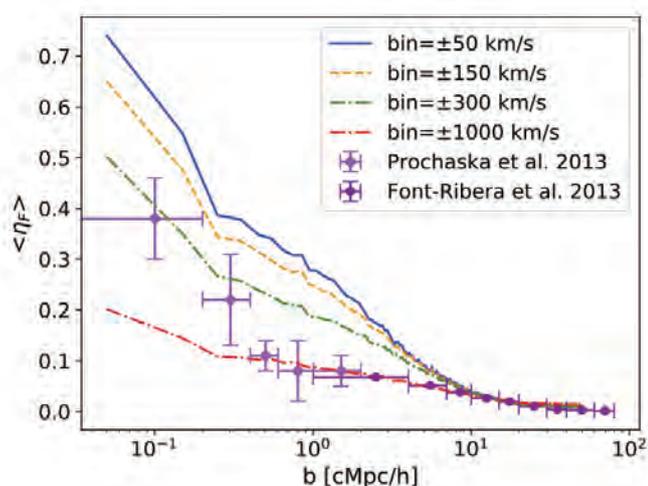


図 6 縦軸に LAF 吸収の平均的度合いを、銀河からの impact parameter (comoving Mpc/h) の関数として表現したもの。 $b > 1$ cMpc/h においては シミュレーションの結果と観測データ (Prochaska et al. 2013; Font-Ribera et al. 2013) はよく合致し、 $b < 1$ cMpc/h の small scale においては分布平均を計算するときの銀河からの速度幅の取り方に結果が影響されることがよくわかる。4本の線がその異なる速度幅の取り方の違いに対応している。観測データもそのバラツキの範囲内に含まれている。

5. 今後の展開

今後は、さらに PFS 観測に対応する擬似 LAF データを作成・解析し、主要観測パラメータの決定にも貢献していく。上述の IGM tomography に加えて、ALMA や SPICA 宇宙望遠鏡計画は銀河に付随するダストの分布に関してもその熱放射データを得るため、我々のシミュレーションと直接比較することで、フィードバックやダストの生成・破壊などの理論モデルの検証が可能である。また、我々は数年後に始まる JWST 宇宙望遠鏡による高赤方偏移銀河についても様々な理論的予測(光度・質量関数など)を提供できる。早期宇宙における矮小銀河形成とそれが作

る電離バブルの研究は、SKA プロジェクトによる宇宙再電離過程の電波観測にも直結している。このように本研究は実際の天文観測データと密接な関連があり、机上の空論ではない。最先端の理論的・数値的テクニックを駆使して実際の観測データとシミュレーションを詳細に比較することで、現在の構造形成理論と宇宙論モデルを検証・発展させていく。

シミュレーションの面では、やはり小スケールにおける解像度の不足が常に課題となっている。そのため H30 年度の計算機資源割り当てによって 1024^3 の粒子数の計算にアップグレードし、simulation box の大きさもより大規模なものにして観測データとの比較に耐えうるものをさらに実行していく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP17H01111 の助成を受けています。また、ここで紹介した研究内容は、大阪大学の清水一紘研究員、大学院生の藤田勝美さん、IPMU の鈴木尚孝さんと K.G. Lee、及びすばる PFS-galaxy チームとの共同研究の成果です。

参考文献

- (1) V. Springel, et al. Nature, **440**, 1137-1144 (2006).
- (2) K.-G. Lee et al. ApJL, **795**, L12 (2014).
- (3) V. Springel, MNRAS, **364**, 1105-1134 (2005).
- (4) F. Haardt & P. Madau, ApJ, **746**, 125 (2012).
- (5) J. X. Prochaska, et al. ApJ, **776**, 136 (2013).
- (6) Font-Ribera, et al. JCAP, **5**, 018 (2013).