2023年度 第53回天文・天体物理若手夏の学校

銀河の星形成・化学進化史と宇宙再電離

柏野大地 国立天文台 科学研究部





対面開催おめでとうございます

招待講師として呼んでくださりありがとうございます

いつでも質問してください





2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校





国立天文台科学研究部 大内正己教授のグループ







Observational cosmology group, ETH Zürich, 2017



- 1. 銀河の星形成と化学進化の歴史
- 2. 銀河と宇宙再電離



銀河の星形成と化学進化の歴史



宇宙138億年の歴史 = 大半は「銀河宇宙」の歴史



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

柏野 大地

© NASA/WMAP Science Team (改変)

宇宙138億年の歴史 = 大半は「銀河宇宙」の歴史



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

© NASA/WMAP Science Team (改変)

銀河進化研究の目標

ビックバン直後の元素のスープ状態の宇宙が、 どのようにして現在の「銀河宇宙」に進化したのか?(そしてこの先どうなるのか?)

- 宇宙で最初の銀河は? (そもそもどこから銀河と呼べるのか?)
- 現在見られるハッブル系列はどのように顕在したか?
- 星形成はなぜ停止するのか?
- 銀河中心の超大質量ブラックホールはどのように発生するのか?
- 形成された時の性質や環境がその後の進化にどのような影響を与えるのか?
- 銀河間空間、そして宇宙全体にどのような影響を与え、また与えられるのか?

銀河によって駆動される物質の進化

この世界はなぜこんなに複雑なのか?

初期の宇宙



水素のヘリウムのみの世界



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校





現在の宇宙





物質の元となるヘリウムよ り重い元素は恒星内部の 核融合によって作られ、 超新星爆発などによって 宇宙空間に供給される。 銀河は星形成の現場

宇宙の星形成史

- 宇宙全体の星形成率密度は、約100億年前(z~2)をピークに現在まで減少している。
- この最も星形成が活発だった時代は cosmic noon と呼ばれる。





cosmic noonの銀河の性質



Kashino et al. 2019a

- 個々の銀河の星形成率は現在の銀河の20倍程度高かった。
- 高い星形成率は、銀河中に大量に存在するガス(星形成の材料)によって支えられていた。
- cosmic noonから現在までは、ガスを消費され星形成が抑制される歴史であった。

2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校





Magdis et al. 2012

銀河の金属量(メタリシティ)

- 金属量=水素に対する重元素(酸素・鉄など)の存在量
- 銀河の金属量は、星形成・ガスの流出入の歴史を反映する
- 銀河の化学進化は非常に簡単なモデルでうまく説明される



ガス相メタル質量の変化 (Z = 金属量)

$\frac{dM_Z}{dt} = Z_{\rm in}\dot{M}_{\rm in}$	$y \cdot y$	SFR - Z(1 - r)S	$FR - Z \cdot \eta \cdot SI$	FR
インフローによる メタル供給		小質量 込まれ	↓ 星に取り るメタル	
(通常 Z _{in} ≪ Z)	大質量 された るメタ	量星で新たに合成 ブス相に還元され マル (y: イールド)	 ガス流出によ メタルの持ち	る 出し





星質量-金属量関係 (MZR)

近傍宇宙 z~0 (SDSS)



- 銀河の進化モデルを制限する上で重要な観測量
- ガス成分(O/H):近傍宇宙からz~4程度までよく制限されている。
- ある星質量で見ると、金属量は赤方偏移と共に減少する。



赤方偏移進化

Mannucci & Creci 2010



星質量-金属量関係:JWSTの登場でz~10に届く



- ビックバンから数億年後には星質量-金属量関係が出現
- 今のところ統計誤差・系統誤差共に大(絶対値・傾き・分散)
- JWST観測が進むにつれてすぐに精度が改善されるはず



星質量-金属量-星形成立関係

- 星質量を固定した時、金属量と星形成率は逆相関を示す
- 高い星形成率を支えるガス流入が金属量の増加を抑制していると解釈できる
- この関係は赤方偏移に依存しなさそうということで、fundamental metallicity relation (FMR) とも 呼ばれるが、本当にfundamental(赤方偏移しない)かは検証が不十分





e.g., Ellison et al. 2008, Lara-López et al. 2010, 2013, Mannucci et al. 2010, Yates et al. 2012, Andrews & Martini 2013, Zahid et al. 2014, Kashino et al. 2016, 2017, Sanders et al. 2018, 2021...

Sanders et al. 2021

星成分の星質量-金属量関係; Stellar MZR

星成分金属量 (stellar metallicity)

- 形成時期が違う(i.e., 金属量が違う) 星々の"平均的"な値
- 様々の元素量を反映(ここではFe)
- Fe はla型超新星で生成されるため、酸素などのα元素に比べて生成に遅れがある。
 - ▶ O/Fe は進化段階の指標に



天の川銀河の恒星

2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

古く、metal-poor星も存在する。 high-z銀河を見れば、このような星の形成現場が 見られるはず

近傍銀河の平均的な星成分金属量 (銀河スペクトルではmetal-rich星の寄与が支配) 的)

よる)をテンプレートでフィットする。

(平均化) してフィットを行う。





銀河の星成分金属量の測定

Kashino et al. (2022):

- >1300個の銀河サンプルを用いて星質量-鉄金属量関係を精度よく測定
- 酸素-鉄比 (O/Fe) が天の川含む近傍銀河よりも大きいことを見出した





Kashino et al. 2022 see also Cullen et al. 2019, 2021

展望:z~>2銀河の大(分光)サーベイ時代が到来

すばる望遠鏡主焦点分光器

- 0.4~1.3 um 波長帯で分光観測
- 一度に最大2400個の天体を分光できる
- 大統計に基づく、精密な銀河進化研究が高赤方偏移で可能に







©Kavli IPMU/NAOJ

Euclid, Roman Space telescope 究極的な広視野探査を実現

Early commissioning test image, NISP instrument **©**ESA



銀河と宇宙再電離













ライマン線の吸収度合いから銀河間空間の 中性度を推定



再電離期に向かって高まる中性度



 $-1 Hr \langle Hoges / High \rangle & \langle \langle W_{HI} \rangle \rangle$ 6 5 3 t^teffi≡ 2

0

2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

Ly *α* に対する光学的厚み (averaged over ~70 cMpc, or $\Delta z=0.15$)



再電離の進み方-「遅い」シナリオが有力視





再電離源は?

- 初代星
- 若い銀河の星形成活動(大質量星由来の紫外線)
- AGN活動(降着円盤由来の紫外線・X線など)
- その他、粒子崩壊などのエキゾチックな新物理

遅い再電離シナリオ」は初代星の寄与は無視できることを示唆。 AGNでは個数(不定性はあるものの)が足りない。 ここ最近は、おそらくみんな銀河だと思っている。

Key question: 電離光子は十分に供給され得るか?

全ての銀河間水素ガスを電離するのに、供給量 [銀河数密度 x 星形成率 x 電離光子生成効率 x 電離光子脱出率] は十分か?





電離光子生成効率

水素バルマー系列線と紫外線光度の比から測定



Key question: 電離光子は十分に供給され得るか?

全ての銀河間水素ガスを電離するのに、供給量 |銀河数密度 x 星形成率 x 電離光子生成効率 x 電離光子脱出率 | は十分か?

電離光子脱出率:再電離時代の銀河では直接観測が不可能(周りの中性水素に吸収されるため容) 低赤方偏移 (z~0.3-4) では電離光子が漏れ出している銀河 (LyC leakers) が見つかっている。 観測や流体シミュレーションからは、 $M_* \sim 10^9 M_{\odot}$ の銀河で $f_{esc} \sim 10-20\%$ 程度はあり得そう。 ➡不定性は大きいが、再電離に必要な供給量に届く見込み (e.g. Naidu et al. 2020)



Key question: 電離光子は十分に供給され得るか?

全ての銀河間水素ガスを電離するのに、供給量 「銀河数密度 x 星形成率 x 電離光子生成効率 x 電離光子脱出率]は十分か?

電離光子脱出率:再電離時代の銀河では直接観測が不可能(周りの中性水素に吸収されるため容) 低赤方偏移 (z~0.3-4) では電離光子が漏れ出している銀河 (LyC leakers) が見つかっている。 観測や流体シミュレーションからは、 $M_* \sim 10^9 M_{\odot}$ の銀河で $f_{esc} \sim 10-20\%$ 程度はあり得そう。 ➡ 不定性は大きいが、再電離に必要な供給量に届く見込み (e.g. Naidu et al. 2020)

しかし、

数勘定が矛盾ないからといって「星形成銀河が再電離を引き起こした」と言ってよいのか? 決定的な証拠として「銀河が周囲のガスを電離している現場」を押さえたい。



どんな観測をすれば良いか?

遠方クエーサーの前景領域(⇒ スペクトルから視線上のガスの物理状態を知ることが可能)で 銀河探査を行い**直接的に銀河と銀河間ガスの相互作用を調査**する



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

柏野 大地

大スケールにおける銀河分布と中性水素分布の逆相関を発見

複数クエーサーの前景領域(z~5.7)で、すばる望遠鏡HSCを用いた銀河探査を実施し、 ~20 cMpcスケールで中性水素量と銀河分布が逆相関の関係にあることをより高い精度で明らかにした。 ➡ 銀河が再電離の主たる電離源であり、銀河が多いところほど再電離が早く進むということを強く示唆



背景クエーサー (z~6)

クエーサーの周辺ではなく「手前」の赤方偏移(z~5.7)で 銀河を同定し、クエーサー視線上の銀河の数密度を測る。

2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

図はプレスリリース(石本、柏川、柏野ほか'22/8/25)より

see Becker et al. 2018, Kashino et al. 2020, Christenson+21; Ishimoto+22

より小さいスケールへ: JWSTで迫る「再電離の現場|

JWSTにより近~中間赤外線領域で高感度分光観測が可能になった。 ➡ 再電離時代の星形成銀河を、静止系可視光の強い輝線を用いて分光探査することが可能に。



遠方(z>6)クエーサー視線に沿っ て星形成銀河の分光探査を行う。 → クエーサースペクトルに見られ る個々の透過光スパイクと銀河の 分布を比較したい。



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

Epoch of Reionizaton

JWST EIGER サーベイ

Emission-line galaxies and Intergalactic Gas in the Epoch of Reionization JWST NIRCamの広視野スリットレス分光 視野内の全ての天体のスペクトルを一度に得る(分散画像)。 取りこぼしなく全数調査を行うことができる。





スリットレス分光:輝線銀河の探査に最適

強い輝線を放射する星形成銀河の探査では、 スペクトルが分散方向に混じり合うことはデメリットにならない。

NIRCam F115W+F200W+F356W





- WFSS grismR modA (8.8 ks)

1つのクエーサー視線領域で>100の星形成銀河を同定

[OIII]二重輝線 (4959, 5007Å) とHβで銀河を同定



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校



34



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

柏野 大地



2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

柏野 大地



注意:透過率の情報はクエーサー視線上のみ





銀河周りの透過曲線が示唆すること





2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校



銀河周辺の高密度ガスによる吸収 (電離度が高くても、残存中性水素も多い)

> 再電離がほぼ完了するころには、 遠くの銀河の放射場の重ね合わせ である背景放射場が支配的になる

再電離進行中は、銀河の局所的な電離放射場 の影響で銀河の近くで透過率が大きくなる (さらに近づくと高密度による吸収の効果が 勝つ)

銀河からの距離

受かってる比較的質量の大きな銀河か、あるいは同じように 分布しているであろう検出限界より暗い銀河か?

銀河周りの透過曲線が示唆すること







再電離中盤から宇宙の夜明け、そして暗黒時代へ

- JWSTを中心とした高感度観測によりz>20の銀河探査
- 初代星の痕跡探し
- 宇宙再電離の3次元空間構造の解明 中性水素が放射する21cm線ならば宇宙の夜明け・暗黒時代に迫れるか

2023年8月1日 天文・天体物理夏の学校

z=12.12

z=13.20

大きく赤方偏移した中性水 素21cm線の検出を目指す SKA-low計画

まとめ 研究のこと、キャリアのこと、なんでも質問してください。

- 銀河研究の対象は宇宙史全体・現象が複雑=研究することがいろいろある(ネタに困らない?)
- 確固とした事実になってきたcosmic noonから現在の銀河進化の描像
 - 集団としてみると、時間と共に星形成率個々の銀河のガス量と星形成率Ⅳ、金属量☑
 - 宇宙全体の星形成率密度 ♪
 - 個々の銀河の進化はよくわからないがまだまだ多い
 - 星形成はなぜ止まるのか?
 - ガス流入の停止・フィードバック・環境効果はそれぞれどのように働くのか?
- 宇宙再電離における銀河の役割
 - 若い星形成銀河が重要な寄与をしていることが観測から強く示唆されている(統計は不十分?)
 - 実際に寄与が大きいのは受かってる比較的質量の大きな銀河か、あるいは検出限界より暗い銀河か? ➡ 電離光子脱出率がどうしても知りたくなる(どうやって測ろう?)
 - 再電離中盤から宇宙の夜明け、さらに暗黒時代では何が起こっているのか? ➡JWSTによるz>20の(初代)銀河探査、SKAによる中性水素直接観測で探る暗黒時代