

Chaire Galaxies et Cosmologie

Galaxies à grand redshift Histoire de la formation d'étoiles

SMACS J0723 -- JWST



Françoise Combes



Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique

Les grandes lignes

1- Techniques de sélection d'objets à grand z Cassure Lyman Chute du flux dans le bleu, puis visible, etc..

2- Résultats obtenus avec Hubble, et télescopes sol Fonction de luminosité La séquence principale, évolution avec z Le milieu circum-galactique

3- Premiers résultats avec le JWST Nombre de galaxies à grand z





Galaxies découvertes avec cassure Lyman

Comment sélectionner les galaxies très lointaines? Champs profonds HUDF >3000 galaxies/ '2

Technique photométrique utilisant la cassure Au-delà de 912 Å: Absorption HI sur la ligne de visée →LBG « Lyman-break galaxies »



La photométrie suffit, permettant des milliers de galaxies en simultané



La technique de la cassure Lyman







Grands programmes photométriques





Selection des galaxies lointaines par leurs couleurs

Steidel et al 1998

Généralisation z-drop, J-drop, H-drop

Pour identifier les galaxies à z>7 parmi les milliers d'autres Généralisation de la technique Lyman break





Dunlop 2013

12 galaxies identifiées à z>7 SFR 1.3 M_o/an Bunker et al 2010 zD2



Définition de la pente β

Pente dans l'UV, entre 1260 et 2580Å

Plus la pente est forte Plus la galaxie est bleue

Effet de la poussière pour le rougissement

Flux $\propto \lambda^{\beta}$





Résultats avec Hubble

Le taux de formation d'étoiles: SFR (z=7) = SFR(z=3)/10**Ces galaxies sont insuffisantes pour réioniser l'Univers** Sauf si fraction échappement fesc > 0.5

Ou bien l'univers est plus homogène que les simulations Ou encore étoiles PopIII, IMF biaisé vers les étoiles massives

Ou alors l'ionisation provient de galaxies encore plus petites → la sensibilité du JWST nécessaire





Fonction de luminosité avant JWST

Objets de plus en plus rares, quelle que soit la technique



Déclin rapide des galaxies z~8-10

Recensement tous champs HST, chute d'un facteur 10 entre z=8 et 10



Densité de formation d'étoiles

Dérivation de SFR, prenant en compte jusqu'à MUV= -17, soit SFR > $0.3 M_{\odot}$ /yr, LBG, + détections ALMA Pas de starburst \rightarrow coupure soudaine entre z=8 et 10



Objet surprenant à z=11.1

400Myr après le Big-Bang Oesch et al 2016



Masse $10^9 M_{\odot}$

Normalement il faudrait 10-100 plus de surface pour détecter un objet aussi brillant

Le z-phot était de 10.2 (Labbé 2008)

L'objet le plus brillant à z> 6 Détecté dans un survey de 0.2°² seulement

Cet objet ferait une distorsion dans la fonction de luminosité

Est-ce une exception? Le progrès attendra les résultats du JWST





Imageur à bande étroite: 2000 émetteurs Ly α (LAE)

Projet sur le télescope Subaru z=5.7-6.6 (Ouchi et al 2017) Biais de b=4.1, les LAE suivent les sur-densités, et sont rassemblés dans les poches ionisées (encore plus, car les photons s'échappent!) Mesure de xHI = 0.15 à z=6.6 dans les halos massifs





Meilleur modèle xHI =0.5 à z=7.3 Mais n'ajuste pas l'agglomération et les surdensités des LAE *Inoue et al 2018*



Ouchi et al 2017

Détection des galaxies à grand z



Spectro-s avec Subaru-HSC Ono et al 2018



579 565 galaxies (technique du dropout) sur $100 \text{ deg}^2 \rightarrow 1.4 \text{ Gpc}^3$



Distinction entre galaxies et quasars





Diverses possibilités



Simulations du milieu circum-galactique



MUSE: gaz atomique froid illuminé par les quasars



Recherche en aveugle des nébuleuses Ly-α autour de 17 RQQ brillants à 3<z<4
Tous ont des nébuleuses Ly-α de 100-320kpc *Borisova et al 2016*

Halos Ly α étendus

Galaxies entre 3 < z < 6Ly α 5-15 x étendu que le continuum UV

Milieu neutre sur plusieurs kpc



Wisotzki, Bacon, Blaizot et al 2016

Grande extension des nébuleuses Ly- α

Présent partout, comme la nébuleuse de la limace,
 Fluorescence du gaz jusqu'à 500kpc
 à z=2, filament de10¹²M_O *Cantalupo et al 2014*

Gaz détecté aussi en absorption devant les quasars → 60% facteur de remplissage en surface du gaz froid et dense



MUSE Champ profond: gas circum-galactique partout

Wisotzki, Bacon, Brinchman et al 2018







81% des LAE ont un halo Lyα étendu -40kpc *Kusakabe, Verhamme, Blaizot et al 2022*

Grands réservoirs de gaz: Dûs à de l'accrétion, de l'éjection, ou les deux

Aussi vus en absorption DLA, sub-DLA ou forêt Lyα

Diagnostics en absorption (MUSE MEGAFLOW)



α est l'angle de position du quasarPar rapport au grand axe de la galaxiei l'inclination de la galaxie sur la ligne de visée

Gaz plus fréquemment en éjection Dans le disque, il montre la même rotation



Mgll éjecté sur la ligne de visée d'un quasar

MUSE: **première détection de MgII en émission** liée à une absorption Extension 25kpc z=0.7 Origine due à l'éjection? (petit axe), Excité par des chocs à grande distance



Zabl et al 2021

Mgll dans un groupe de galaxies, z=1.31

Contours blancs 1.5, 2, 3σ Contours bleus: absorption sur 1000 kpc² Outflow de la galaxie centrale Profil P-cygni + [FeII] sur le petit axe

→ courants de marée, éjections Créent le milieu inter-galactique





Gaz froid étendu

Spiderweb (Emonts et al 18)

CANDELS-5001, (Ginolfi et al 17)



Contours bleus: CI with ALMA Contours rouges, continuum radio CO(4-3) sur image HST proto-amas à z=3.5

Télescope James Webb: avantage à grand z

HST uniquement jusqu'à 1.6 microns
→ la galaxie la plus lointaine au redshift de 11 quand l'Univers avait 420 millions d'années.

La caméra NIRCam de Webb jusqu'à 5 microns,
→ z~20-30!, + sensibilité x 10 environ 10 millions d'années après le Big-Bang

Premier champ profond, avec le télescope cosmique qu'est l'amas de galaxies SMACS0723, une masse importante → amplification de 1-2 ordres de grandeur



Lancé le 25/12/21 par Arianne, vers L2 6m au lieu de 2m 10 ans de durée de vie?

SMACS 0723

Un des champs du JWST est l'amas de galaxies SMACS 0723

➔ Permet d'amplifier les galaxies d'arrière-plan

z=0.39



MACS J1149+2223, z=0.55 Croix d'Einstein d'une SN à z=1.49



Supernova x 4 Amplification µ=20

Amas globulaires dans SMACS 0723 z=0.39



Luminosité diffuse dans l'amas d'avant-plan

+ pics lumineux

2.4 10^6 M_{\odot} 0.2 - 0.3 Z_{\odot} Amas globulaires?

Arrachés de leurs galaxies ou bien formés dans une queue de marée/flot de refroidissement

Faisst et al 2022

SMACS 0723

Deux sous-amas en coalescence

Température décroît vers le centre 5keV, au lieu de 10keV dans le choc

Flot de refroidissement?

Gaz froid, et formation d'étoiles?

Alden & Burns 2022



Lentilles gravitationnelles

Amas de galaxies SMACS 0723 z=0.39 4 milliards d'années

→ Permet d'amplifier les galaxies d'arrière-plan, jusqu'à 750!

L'image de Hubble: Détection de 5 galaxies lointaines NIRCAM détecte **14 nouvelles galaxies lointaines, avec 42 images multiples.** Au total 19 galaxies font remonter le temps de plus de 13 milliards d'années Pascale et al 2022 Num galaxie, num image + Croix d'Einstein (4 images)





hat_wfc3_tr_hst_acs_wfc_f435w+hst_acs_wfc_f666w+hst_acs_wfc_f814w+jwst_nircam_multiple_f090w+hst_wfc3_tr_f165w(5.9ks) hst_wfc3_tr_jwst_nircam_multiple_f150w+jwst_nircam_multiple_f200w+hst_wfc3_tr_f125w+hst_wfc3_tr_f140w+hst_wfc3_tr_f160w(4.5ks) jwst_nircam_nrcblong_jwst_nircam_nrcblong_f277w+jwst_nircam_nrcblong_f356w+jwst_nircam_nrcblong_f444w(7.5ks)

Identification des « dropouts »

z=7.6, 8.5, 10, confirmé par spectre Étoiles jeunes, H β [OIII] extremes



Modélisation GALFIT *Morishita & Stiavelli 2022*

Télescope James Webb: Premiers résultats



Harrikane et al 2022

Réionisation

Galaxies à z=16 (250Myr), z=10-12 Pente-UV bleu extreme -3 $<\beta$ <-2.5, jeunes ages 10- 100 Myr log M \star/M_{\odot} = 8.4- 8.8 Atek et al 2022

Function de luminosité des galaxies vs redshift, d'après *Donnan et al 2022*55 galaxies à grand z>8, 44 nouvelles
6 galaxies à z>12, une à z=17



Atek et al 2022





Spectroscopie infrarouge avec JWST



Spectroscopie infrarouge (NIRSpec)



Couleurs des galaxies

Possible d'avoir des couleurs à z>9 →comp FLARES simulations





Fonction de luminosité

Bouwens et al 2022 N(M_{UV}) ne semble pas décroître à z=12, comme avant

Ligne rouge: modèle hiérarchique Formation d'étoiles dûe au gaz froid venant des filaments, SFE quasi-





Galaxies à z=12, starburst jeune pente-UV très bleues, β =-2.7



Histoire de la formation stellaire

Bouwens et al 2022



Oesch et al 2018

Galaxies obscurcies

Masses $10^{9-11} M_{\odot}$ 8 < z < 13

#1 PENNAR 10⁰ [\[]"] 10⁻². z=12.1 10 5 z 10-4 2.5 5.0 7.5 10.0 12.5 15**.0** 17.5 20.0 $\lambda [\mu m]$ F200W F090W F150W F277W F356W F444W - 12 × F770W F1000W F1500W F1800W ×

Rodighiero et al 2022



Galaxies éteintes à 2µm Mais visibles à 4µm NIRCam, MIRI

Galaxies poussièreuses

Rodighiero et al 2022

Sur la séquence principale (corrigés de l'amplification)

Abondance de poussières surprenante pour z> 7 Av > 5.8mag (galaxies primordiales)





Spirales par la tranche

Objets manquants dans les précédents surveys

Galaxies spirales obscurcies, non détectées par HST, à 1.6 µm Mais par JWST à 4.4µm

 $2 < z < 6, M > 10^{10} M_{\odot}$

Progéniteures de lenticulaires?

Nelson et al 2022



Galaxies à z=17 identifiées

Fujimoto et al 2022

SED compatible avec z=17



Grand nombre de galaxies z>9

Surprenante abondance: Est-ce que l'IMF avantagerait les étoiles de grande masse?

Galaxies 2x plus brillantes que prévu à z=11





Modèles cosmologiques

Les résultats du JWST à grand z peuvent-ils favoriser un modèle CDM, WDM?

WDM supprime les petites structures

Mais si la masse > 3-4 keV, pas d'impossibilité totale

Statistiques à z=16 encore insuffisantes



Prédiction halo matière noire

Dans le modèle standard, le nombre de halos de masse Mh est connu La fraction maximale de baryons 17%

Gaz \rightarrow étoiles, quelle efficacité? ε Feedback SN : aujourd'hui <4% de baryons A z~10 \rightarrow tension

Boylan-Kolchin 2022



Vol=10⁵ Mpc³ observés à z=10

Simulations

Certaines des galaxies observées dépassent même la fraction de baryons disponibles dans le modèle ΛCDM



Boylan-Kolchin 2022



Simulations

Le nombre de petites structures pourraient distinguer entre WDM et CDM

Mais le nombre de structures massives ne distinguent pas

Toutefois le WDM m< 2keV semble éliminé

Maio & Viel 2022



Etoiles PopIII

Pour z > 10, ou un âge de ~500 Myr les étoiles peuvent être de PopIII Faible métallicité, forte masse PopI riche en métaux PopII pauvre en métaux PopIII?





Même si, au cours du temps, la galaxie accumule des métaux, Les PopIII peuvent se former dans des régions externes $M=60-300 M_{\odot}$ Durée de vie < 1 Myr

Yajima et al 2022

Formation des étoiles

La fraction de PopIII diminue avec la masse stellaire Peut être 10% pour les naines $(10^5 M_{\odot})$



M/L plus petit Plus facile d'expliquer le grand nombre de galaxies





Yajima et al 2022

Contraintes et tensions

Même des galaxies très massives, dans des régions sur-denses de l'Univers Ne peuvent pas expliquer les data JWST *(Donnan +22, Harikane+22, Naidu+22)*

Encore dans l'inconnu: feedback moindre à faible métallicité?

Cas type de GN-z11: métallicité Z=0.05 Z_☉ Mais pas d'obscuration: pourquoi?



Yajima et al 2022

Métallicité et poussière

Cas type de GN-z11: métallicité Z=0.05 Z_☉ Mais pas d'obscuration: pourquoi? → Vent dû à des supernovae +Ondes de choc détruisent la poussière Mais la poussière retombe après 20 Myr



→Pourrait expliquer à la fois les galaxies poussiéreuses et les brillantes en UV

Nath et al 2022



Résumé

1- Techniques des redshifts photométriques A prendre avec précautions!

2- Résultats avec Hubble, et télescopes sol Fonction de luminosité, s'arrête à z~10 (1.6μm) Le milieu circum-galactique, MUSE & ALMA

3- Premiers résultats avec le JWST Grand nombre de galaxies à grand z, trop grand? Solutions: PopIII, IMF, feedback insuffisant?

