

Du gaz et de la poussière dans les quasars à grand décalage spectral

Alexandre “*High-z Rider*” Beelen
Sous la direction de Pierre Cox

Institut d'Astrophysique Spatiale, Orsay

7 décembre 2004



Plan

- 1 Introduction
 - Histoire de la formation stellaire
 - Quasars
 - Outils
- 2 Poussières dans les quasars à grand décalage spectral
 - Propriétés des poussières à grand-z
 - Relevés (sub)millimétriques de quasars à grand-z
 - Relevés MAMBO de quasars à $z > 5.7$
 - Conclusions
- 3 Gaz dans les quasars à grand décalage spectral
 - Gaz moléculaire dans le quasar J1409+5828 à $z = 2.58$
 - Gaz moléculaire dans le quasar J1148+5251 à $z = 6.42$
 - Gaz moléculaire dans les quasars à grand-z
 - Autres traceurs du gaz dense à grand-z



Plan

1 Introduction

- Histoire de la formation stellaire
- Quasars
- Outils

2 Poussières dans les quasars à grand décalage spectral

- Propriétés des poussières à grand- z
- Relevés (sub)millimétriques de quasars à grand- z
- Relevés MAMBO de quasars à $z > 5.7$
- Conclusions

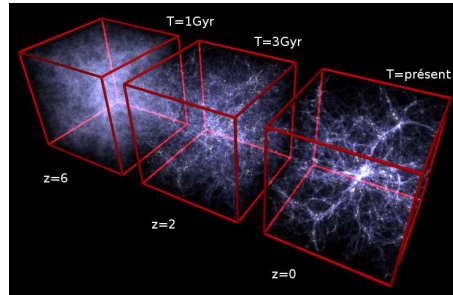
3 Gaz dans les quasars à grand décalage spectral

- Gaz moléculaire dans le quasar J1409+5828 à $z = 2.58$
- Gaz moléculaire dans le quasar J1148+5251 à $z = 6.42$
- Gaz moléculaire dans les quasars à grand- z
- Autres traceurs du gaz dense à grand- z



Formation des structures

- Univers homogène
 - gravitation
- Premières sources
 - étoiles (?)
 - trou noir (?)

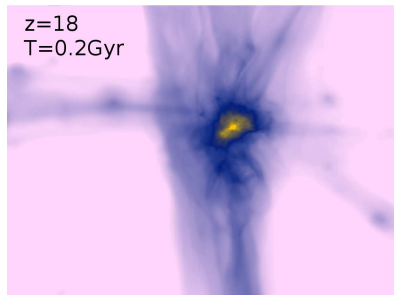


Volker Springel, Virgo node at MPA



Formation des structures

- Univers homogène
 - gravitation
- Premières sources
 - étoiles (?)
 - trou noir (?)

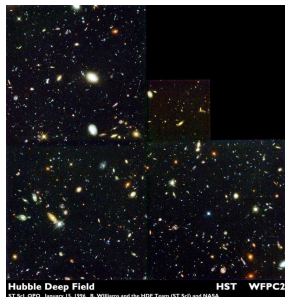


Abel et al. 2000



Histoire de la formation stellaire

- Relevés profonds
 - relevés optiques
 - sources infrarouges
 - relevés *submillimétriques*
- Fond extragalactique
 - $E_{\text{opt}} \sim E_{\text{submm}}$



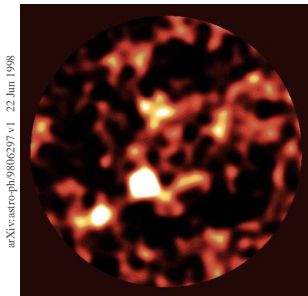
Williams et al. 1996

- Difficulté d'identification
 - Radio Galaxies, Lyman Break Galaxies, Quasars...



Histoire de la formation stellaire

- Relevés profonds
 - relevés optiques
 - sources infrarouges
 - relevés *submillimétriques*
- Fond extragalactique
 - $E_{\text{opt}} \sim E_{\text{submm}}$



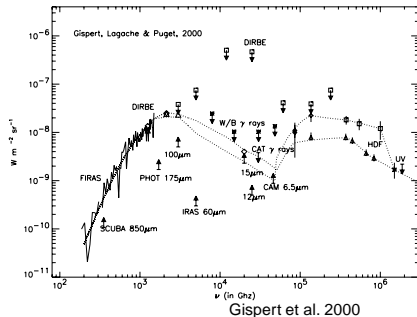
Hughes et al. 1998

- Difficulté d'identification
 - Radio Galaxies, Lyman Break Galaxies, Quasars...



Histoire de la formation stellaire

- Relevés profonds
 - relevés optiques
 - sources infrarouges
 - relevés *submillimétriques*
- Fond extragalactique
 - $E_{\text{opt}} \sim E_{\text{submm}}$

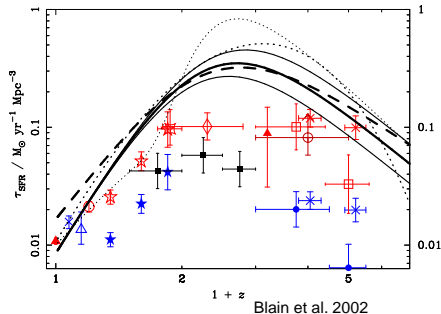


- Difficulté d'identification
 - Radio Galaxies, Lyman Break Galaxies, Quasars...



Histoire de la formation stellaire

- Relevés profonds
 - relevés optiques
 - sources infrarouges
 - relevés *submillimétriques*
- Fond extragalactique
 - $E_{\text{opt}} \sim E_{\text{submm}}$

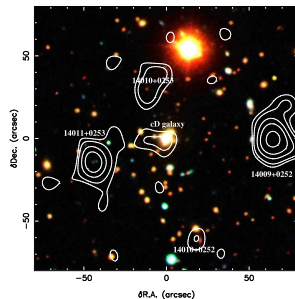


- Difficulté d'identification
 - Radio Galaxies, Lyman Break Galaxies, Quasars...



Histoire de la formation stellaire

- Relevés profonds
 - relevés optiques
 - sources infrarouges
 - relevés *submillimétriques*
- Fond extragalactique
 - $E_{\text{opt}} \sim E_{\text{submm}}$



Ivion et al. 2000

- Difficulté d'identification
 - Radio Galaxies, Lyman Break Galaxies, Quasars...



Quasars

- Source énergétique -
 $L_b = 10^{8-14} L_{\odot}$
- Noyaux Actif de Galaxie (NAG)
- Galaxie hôte



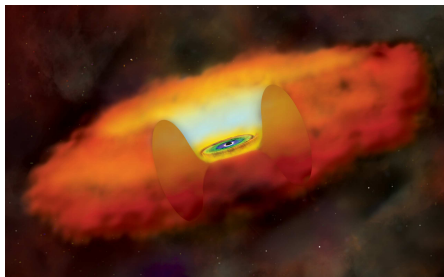
artist view - G.F. Lewis

- Lien entre galaxie hôte et NAG ?



Modèle unifié

- NAG
 - radio galaxie
 - galaxie seyfert
 - quasars
- Modèle standard
 - Trou noir massif
 - Tore de poussière



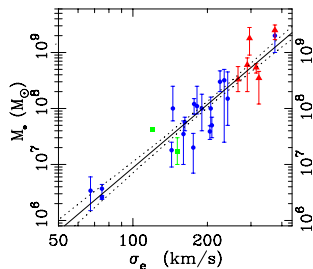
artist view - Chandra Coll.

- Quasars type I/II
- Quasars radio fort/faible



Trous noirs et formation stellaire ?

- Galaxies sphéroïdale locales
 - Masse du trou noir central
 - Dispersion en vitesse



Gebhardt et al. 2000

- Formation du trou noir et du bulbe
- Quasars ($M_{\text{BH}} > 10^9 M_\odot$) et galaxie hôte ?



Questions ?

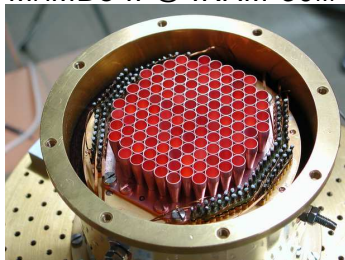
- Formation stellaire dans la galaxie hôte ?
 - température des poussières ?
 - densité/température du gaz ?
- Trous noirs supermassifs et formation stellaire ?
 - formations simultanées ?
 - activités parallèles ?
- Premières sources ?



Matrices de bolomètres

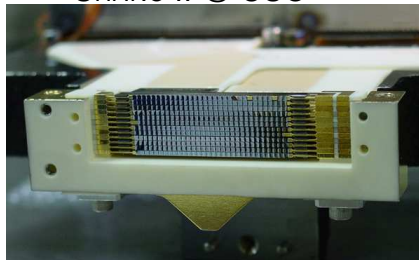
Sensibilité

MAMBo II @ IRAM-30M



117 ch @ 1.2mm
 $\sim 40 \text{ mJy}/\sqrt{\text{Hz}}$

SHARC II @ CSO



12 × 32 ch @ 350 μm
 $\sim 1 \text{ Jy}/\sqrt{\text{Hz}}$



Interféromètres

Résolution spatiale & spectrale

SIS @ PdBI



6 ant. - 15m @ 1mm & 3mm
1.3" à 0.6"

SIS @ VLA



27 ant. - 25m @ ...20cm ...
24" à 0.05"



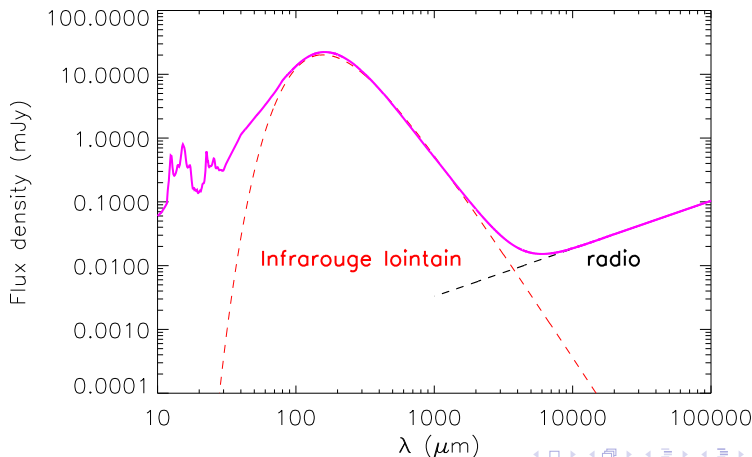
Plan

- 1 Introduction
 - Histoire de la formation stellaire
 - Quasars
 - Outils
- 2 **Poussières dans les quasars à grand décalage spectral**
 - Propriétés des poussières à grand- z
 - Relevés (sub)millimétriques de quasars à grand- z
 - Relevés MAMBO de quasars à $z > 5.7$
 - Conclusions
- 3 Gaz dans les quasars à grand décalage spectral
 - Gaz moléculaire dans le quasar J1409+5828 à $z = 2.58$
 - Gaz moléculaire dans le quasar J1148+5251 à $z = 6.42$
 - Gaz moléculaire dans les quasars à grand- z
 - Autres traceurs du gaz dense à grand- z

Galaxie hôte : émission infrarouge et radio

Galaxie infrarouge ultralumineuse

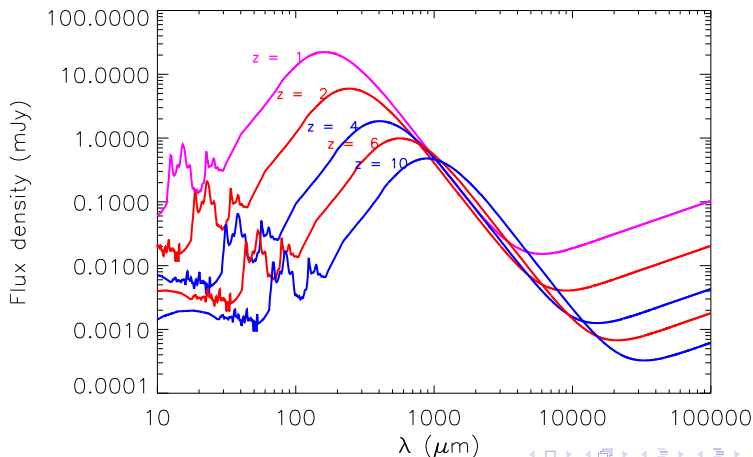
$$L_{\text{FIR}} = 10^{12} L_{\odot}$$



Galaxie hôte : émission infrarouge et radio

Galaxie infrarouge ultralumineuse

$$L_{\text{FIR}} = 10^{12} L_{\odot}$$

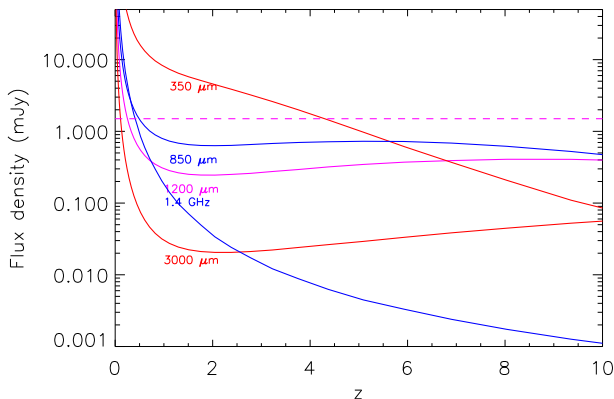


Correction K inverse

Blain & Longair 1993

- Galaxie infrarouge ultralumineuse

$$L_{\text{FIR}} = 10^{12} L_{\odot}$$



Poussière à grand décalage spectral

- Première observation à $z = 2$ Clements et al. (1992); Downes et al. (1992)
- Observations à $z \sim 4$ McMahon, Omont, Bergeron et al. (1994)
- Premier *relevé* Omont, McMahon, Cox et al (1996)
- Nature de l'émission Benford, Cox, Omont et al. (1999); Priddey & McMahon (2001)
Beelen et al. (2005)
- Relevés significatifs Omont et al. (2001), Omont, Beelen, et al. (2003); Carilli et al. (2001)
Isaak et al. (2002); Priddey et al. (2003, 2003b); Willot et al. (2003)
Beelen et al. (in prep.)
- Première source à $z > 6$ Bertoldi, et al. (2003)



Estimer les propriétés intrinsèques de la source

- Densité de flux mesurée

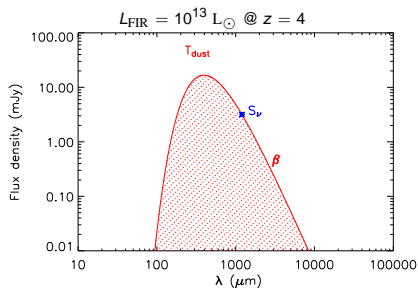
$$S_\nu$$

- Corps noir modifié

$$B_\nu(T_{\text{dust}}, \beta)$$

- Lum. infrarouge lointain

$$L_{\text{FIR}} = \int L_\nu d\nu$$



Luminosité infrarouge et masse de poussière

$$L_{\text{FIR}} = \frac{4\pi D_L^2}{(1+z)} \left(\frac{k_B}{h}\right)^\beta \frac{\Gamma(4+\beta) \zeta(4+\beta)}{\pi^5/15} \frac{\sigma T_{\text{dust}}^{4+\beta}}{\nu_{\text{rest}}^\beta B_{\nu_{\text{rest}}}(T_{\text{dust}})} S_{\nu_{\text{obs}}}$$

$$M_{\text{dust}} = \frac{D_L^2}{(1+z)} \frac{S_{\nu_{\text{obs}}}}{\kappa(\nu_{\text{rest}}) B_{\nu_{\text{rest}}}(T_{\text{dust}})}$$

- $S_{1.2\text{mm}} = 1 \text{ mJy}$ @ $z = 4$
 $T_{\text{dust}} = 47 \text{ K}, \beta = 1.6$

$$L_{\text{FIR}} = 3 \times 10^{12} L_\odot$$

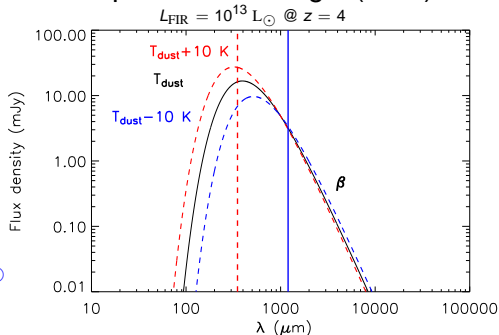
$$M_{\text{dust}} \approx 10^8 M_\odot$$



Observer à plus courte longueur d'onde

Caractériser la Distribution Spectrale d'Énergie (SED)

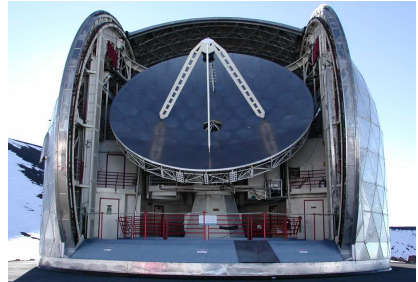
- T_{dust}
 $L_{\text{FIR}} = 1 \times 10^{13} L_{\odot}$
- $T_{\text{dust}} + 10 \text{ K}$
 $L_{\text{FIR}} = 2 \times 10^{13} L_{\odot}$
- $T_{\text{dust}} - 10 \text{ K}$
 $L_{\text{FIR}} = 0.4 \times 10^{13} L_{\odot}$



Programme d'observation avec SHARC II au CSO

Beelen et al. (2005)

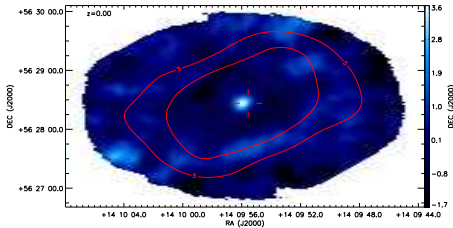
- Critères de sélection
 - brillant en millimétrique
 - plusieurs points photométriques
 - observables (!)
- 30 nuits d'observations
 - 2 nuits utiles en janvier 2004
- 6 quasars entre $1.8 < z < 6.4$



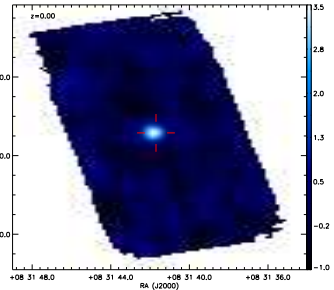
Carte SN observée à $350 \mu\text{m}$

Beelen et al. (2005)

J1409+5628
 $z = 2.58 - 3.6$



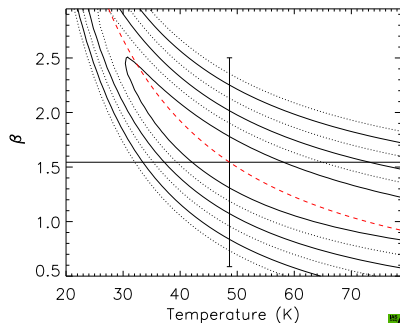
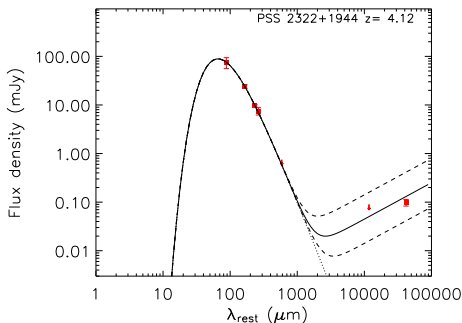
APM 08279+5255
 $z = 3.91 - 20 \text{ min}$



Un point sur la SED

Beelen et al. (2005)

Pss 2322+1944 ($z = 4.11$)

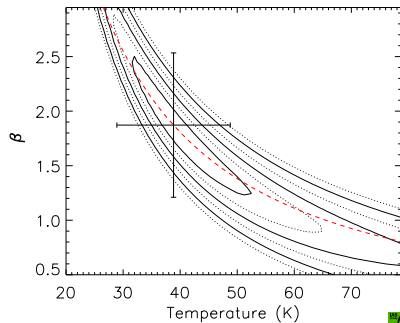
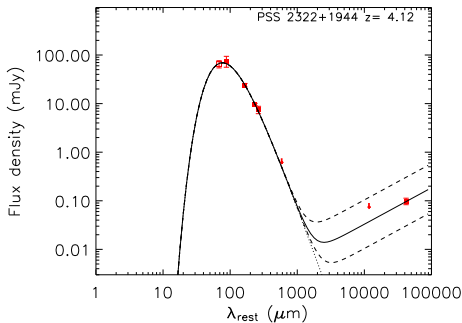


Un point sur la SED

Beelen et al. (2005)

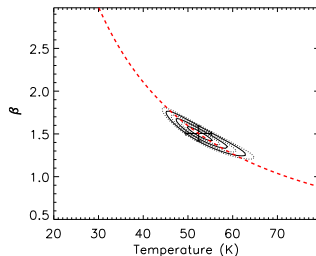
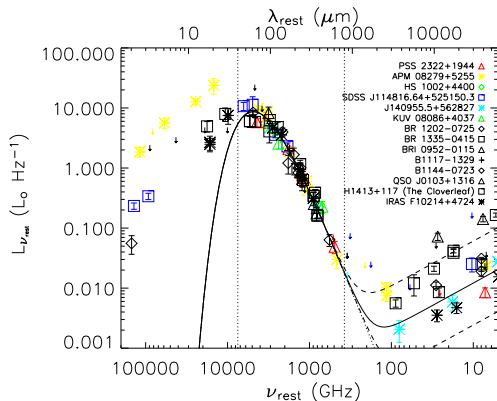
$$L_{\text{FIR}} = (3.0 \pm 0.6) 10^{13} L_{\odot}$$

$$T_{\text{dust}} = 43 \pm 5 \text{ K} \quad \beta = 1.6 \pm 0.2$$



Distribution spectrale d'énergie moyenne

$$T = 50 \pm 3 \text{ K}, \beta_{\text{eff}} = 1.6 \pm 0.1$$



Vue d'ensemble

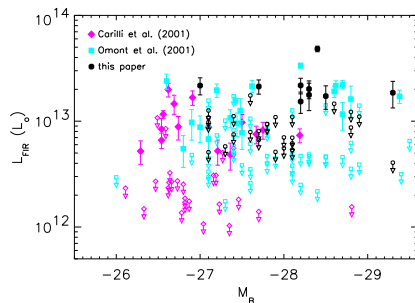
Authors	#	wavelength (μm)	z	M_B	median σ (mJy)
Omont et al. (2001)	65	1200	3.85 – 4.56	-26.0 – -29.5	0.8
Carilli et al. (2001)	82	1200	3.55 – 5.03	-26.1 – -28.8	0.3
Isaak et al. (2002)	28	850	3.92 – 4.47	-26.3 – -29.5	3.0
Omont et al. (2003)	35	1200	1.75 – 2.85	-27.0 – -29.3	0.9
Petric et al. (2003)	9	1200	5.09 – 6.28	-24.0 – -28.1	1.0
Bertoldi et al. (2003)	3	1200	6.05 – 6.41	-26.3 – -28.0	0.1
Priddey et al. (2003)	56	850	1.50 – 2.97	-27.4 – -29.1	2.8
Priddey et al. (2003b)	14	850	4.95 – 6.28	-22.7 – -28.1	1.6
Willott et al. (2003)	30	850	2.00 – 2.54	-26.1 – -27.9	2.5



Activité du trou noir et formation stellaire

Omont, Beelen et al. (2003)

- M_B activité du trou noir
- L_{FIR} formation stellaire
- Taux de détection : $\sim 30\%$
- Analyse de survie
 - pas de corrélation
 - $z \sim 4$ et $z \sim 2$



Omont, Beelen et al. 2003

- Sources optiquement moins lumineuses



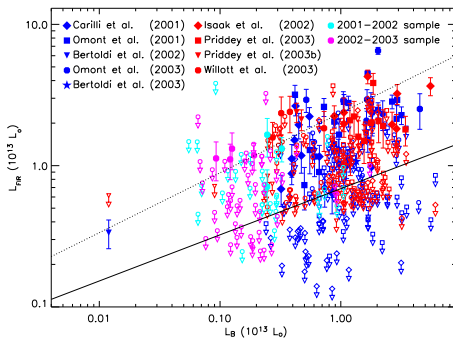
Relevés optiquement faibles - Observations

- Échantillon de quasars du SDSS (EDR + Fan et al. 2001)
 - optiquement *moins* lumineux ($-24 < M_B < -26$)
 - radio faible (relevé FIRST)
 - 39 sources observées à $z \sim 2$ et $z \sim 4$
 - hivers 2002-2003, 2003-2004
- Réduction de données
 - réduction cohérente
 - traitement de masse
 - pipeline modifié pour les sources faibles
 - bruit corrélé moyen



Activités du trou noir et de la formation stellaire

- 346 sources
 - 27% de détections
- Analyse de survie



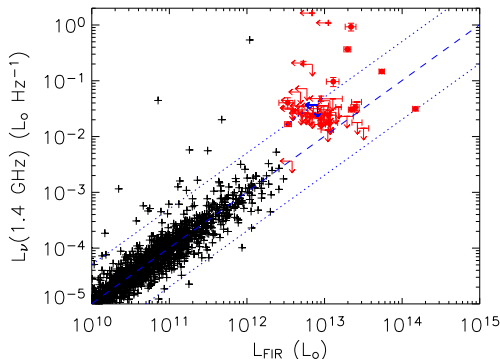
$$\log L_{FIR} = (8.36 \pm 0.90) + (0.33 \pm 0.07) \times \log L_B$$



Corrélation infrarouge-radio

- Galaxies infrarouges ultralumineuses
- Différents traceurs de la formation stellaire

Yun et al. 2001



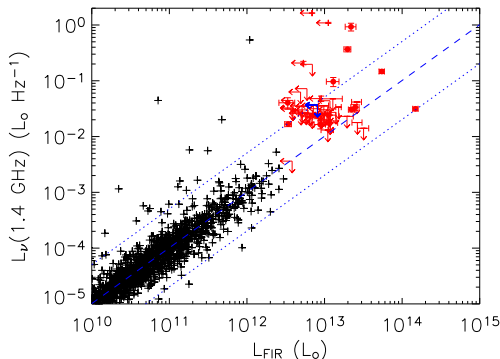
- Chauffage des poussières dominé par la formation stellaire



Corrélation infrarouge-radio

- Galaxies infrarouges ultralumineuses
- Différents traceurs de la formation stellaire

Yun et al. 2001



- Chauffage des poussières dominé par la formation stellaire



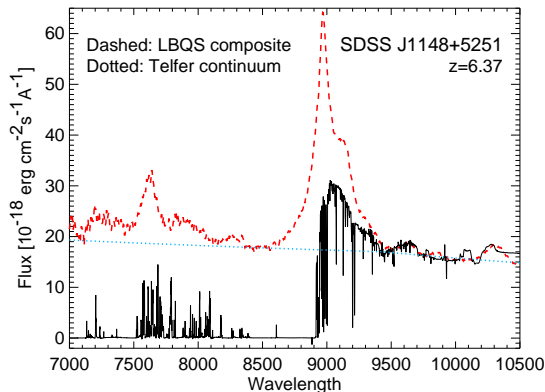
Sonder la fin de la réionisation

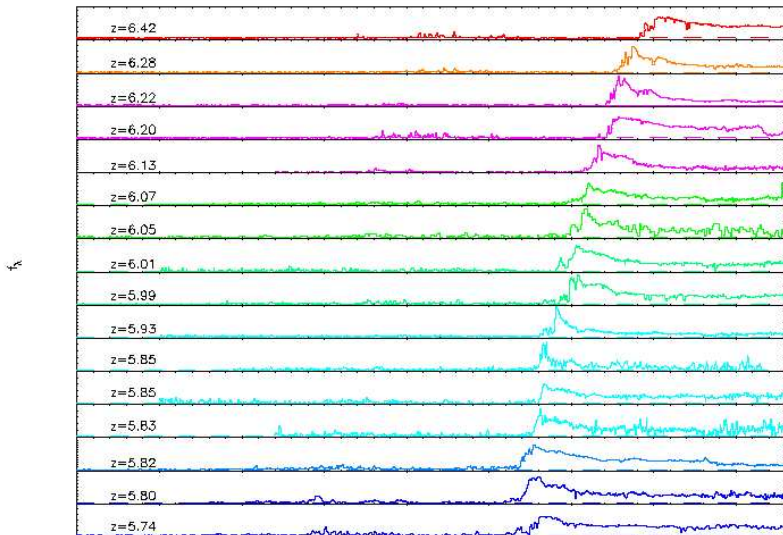
- Quasars du SDSS à $z > 5.7$ Fan et al. (2001, 2003, 2004)
- Suivis de l'émission millimétrique
 - Petric et al. 2003 4 quasars
 - Bertoldi et al. 2003b 3 quasars - SDSS J1148+1944
 - Beelen et al. (2005) 5 quasars
- Échantillon complet de 12 quasars
 - $5.80 < z < 6.42$, $-26.31 < -M_B < -28.10$
 - 2 quasars détectés à $> 3\sigma$ r.m.s ~ 0.5 mJy



La fin de la réionisation

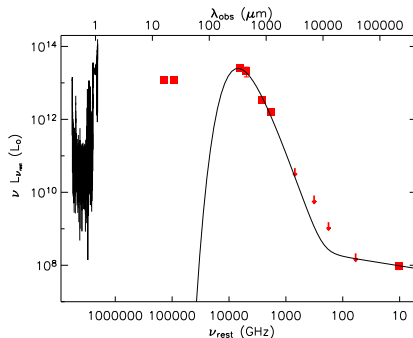
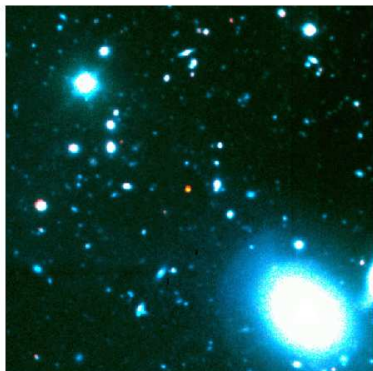
- Effet Gunn-Peterson





SDSS J1148+5251 à $z = 6.4$

- Émission thermique de la poussière



Formation de la poussière

- Pas d'évidence d'amplification gravitationnelle

- $L_{\text{FIR}} = (2.7 \pm 0.4) \times 10^{13} L_{\odot}$

- $M_{\text{dust}} \approx 7 \times 10^8 M_{\odot}$

- Taux de formation stellaire

$$\text{SFR} \sim 2000 M_{\odot}/\text{yr}^{-1}$$

- ~ 0.7 Gyr depuis la réionisation

($z_r \sim 17$ - WMAP)

$$Y_{\text{dust}} \sim 1 M_{\odot}/\text{yr}^{-1}$$

- Production classique : étoiles peu massives ($M \leq 8 M_{\odot}$)

- SN II, PISN, BAL, ...

- Poussière produites par SN ?

- observation directe (CasA ?)

Dunne et al. (2004), Hines et al. (2004)

- $Y_{\text{SN}} = ?$



Conclusions

- Propriétés moyenne d'émission des poussières
 - $T_{\text{dust}} = 50 \text{ K}, \beta = 1.6$
 - $L_{\text{FIR}} = 10^{13} L_{\odot}, M_{\text{dust}} \sim 10^8 M_{\odot}$
- Corrélation infrarouge-optique
 - lien entre trou noir et galaxie hôte
 - décalage temporel ?
- Problème de la formation de la poussière
 - SNII ?
- Rapport gaz/poussière local ~ 100
 - énorme réservoir de gaz
 - rechercher le gaz moléculaire à grand-z



Plan

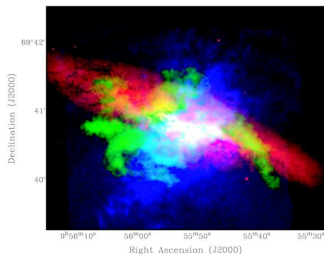
- 1 Introduction
 - Histoire de la formation stellaire
 - Quasars
 - Outils
- 2 Poussières dans les quasars à grand décalage spectral
 - Propriétés des poussières à grand- z
 - Relevés (sub)millimétriques de quasars à grand- z
 - Relevés MAMBO de quasars à $z > 5.7$
 - Conclusions
- 3 **Gaz dans les quasars à grand décalage spectral**
 - Gaz moléculaire dans le quasar J1409+5828 à $z = 2.58$
 - Gaz moléculaire dans le quasar J1148+5251 à $z = 6.42$
 - Gaz moléculaire dans les quasars à grand- z
 - Autres traceurs du gaz dense à grand- z



Monoxyde de carbone

CO

- Traceur du gaz moléculaire
 - $\text{CO}/\text{H}_2 \leq 10^{-4}$
 - $n(\text{H}_2) > 300 \text{ cm}^{-3}$



R : étoiles ; G : CO ; B : $\text{H}\alpha$ - Walter et al.

(2002)

- $M(\text{H}_2) = X L'_{\text{CO}}$
 - $X = 3.5 M_{\odot} (\text{K kms}^{-1} \text{ pc}^2)^{-1}$
 - $X = 0.8 M_{\odot} (\text{K kms}^{-1} \text{ pc}^2)^{-1}$ (ULIRGs)

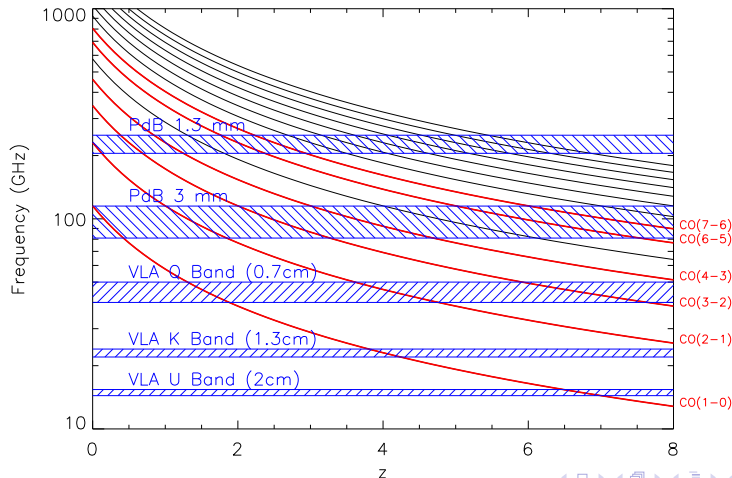
Dickman 1975

Downes & Solomon 1998

- Masse dynamique



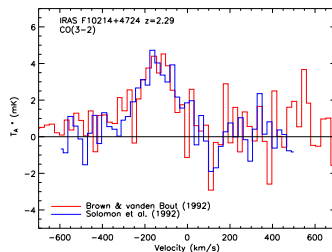
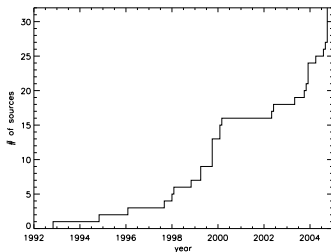
Observer les raies de CO à grand-z



Première observation à grand-z

● IRAS F10214+4724 @ $z = 2.29$

- Brown & vanden Bout (1992a)
- Solomon et al. (1992)



- Nombre cumulé de détection de CO



J1409+5828 @ $z = 2.58$

Beelen et al. (2004)

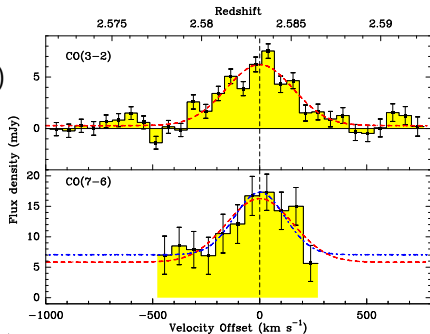
- Source la plus brillante de l'échantillon Omont et al. 2003
 - $S_{250\text{GHz}} = 10.7 \pm 0.6$ mJy
 - $L_{\text{FIR}} = (3.4 \pm 0.6) \times 10^{13} L_{\odot}$
 - $T_{\text{dust}} = 41 \pm 2$ K, $\beta = 1.5$
 - $SFR \approx 3 \times 10^3 M_{\odot}/\text{yr}^{-1}$
- Pas d'amplification gravitationnelle
- Décalage spectral mal connu
 - $2.55 < z < 2.58$



Observations millimétriques et radio

Beelen et al. (2004)

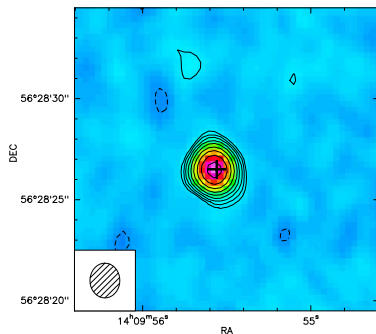
- PdBI (52h/27h)
 - CO(3 \rightarrow 2) & CO(7 \rightarrow 6)
 - continuum à 1 mm
 - $1'' \times 0.5''$
- Détection CO(3 \rightarrow 2)
 - $z = 2.5832 \pm 0.0002$
 - $M_{\text{H}_2} \sim 6 \times 10^{10} M_{\odot}$
 - émission gaz @
 $d < 5$ kpc



Observations millimétriques et radio

Beelen et al. (2004)

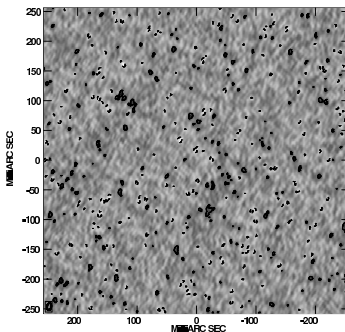
- VLA (2h)
 - continuum à 1.4GHz
 - $1.7'' \times 1.5''$
- Détection de l'émission continuum à 1.4 GHz
 - chauffage des poussières
 - émission continuum @
 $d < 5$ kpc



Observations millimétriques et radio

Beelen et al. (2004)

- VLBA (14h)
 - continuum à 1.4GHz
 - $12.5\text{mas} \times 6.7\text{mas}$
- Non-détection de l'émission continuum
 - NAG non dominant
 - émission continuum @ $d > 1\text{ kpc}$



Résultats

- Décalage spectral
 - proche d'une raie CIV
- Émission radio
 - pas de contamination de l'émission radio par le NAG
 - chauffage dominé par la formation stellaire
- Gaz moléculaire
 - réservoir de gaz moléculaire
 - $\tau_{\text{gaz}} = 20 \text{ Myr}$
- Taille des sources
 - Formation stellaire sur un tore ou un disque
 - $1 \text{ kpc} < d < 5 \text{ kpc}$



J1148+5251 à $z = 6.42$ - Observations & résultats

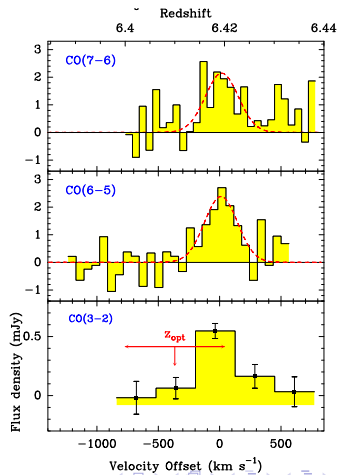
Bertoldi et al. 2003b, Walter et al. 2003

● PdBI/VLA

- CO(7 → 6), CO(6 → 5)
- CO(3 → 2)

● Conditions physiques

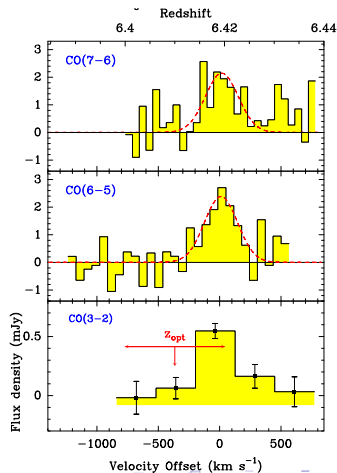
- typique ULIRGs locaux
- $n(\text{H}_2) = 4.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$
- $T_{\text{kin}} = 120 \text{ K}$
- $M(\text{H}_2) = 10^{10} M_{\odot}$



J1148+5251 à $z = 6.42$ - Observations & résultats

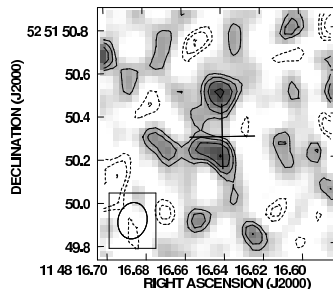
Bertoldi et al. 2003b, Walter et al. 2003

- PdBI/VLA
 - CO(7 → 6), CO(6 → 5)
 - CO(3 → 2)
- Conditions physiques
 - typique ULIRGs locaux
 - $n(\text{H}_2) = 4.5 \times 10^4 \text{ cm}^{-3}$
 - $T_{\text{kin}} = 120 \text{ K}$
- $M(\text{H}_2) = 10^{10} M_{\odot}$



J1148+5151 à $z = 6.42$ - Émission résolue

- Walter et al. (2004)
 - $M_{\text{H}_2} = 2 \times (5 \times 10^9) M_{\odot}$
 - $M_{\text{dyn}} (< 2.5 \text{ kpc}) \approx 4.5 \times 10^{10} \sin^{-2} i M_{\odot}$
- Émission optique
 - fusion ?

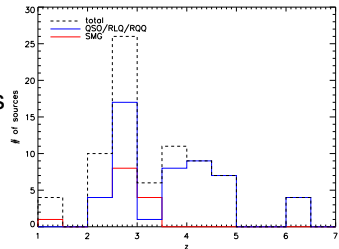


Walter et al (2004)

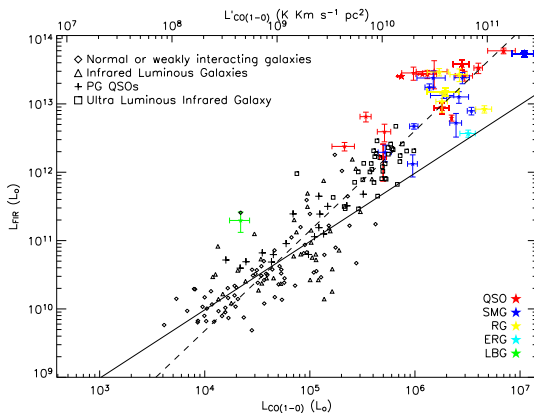


Base de données CO-continuum

- Une seule source d'information :
 - position, amplification
 - raies CO/HCN/C₁
 - continuum (sub)millimétrique/radio
 - référence/commentaires
- Produits :
 - statistiques/graphiques simples
 - tables récapitulatives
 - pages WEB
 - fichier de données



Efficacité de formation stellaire

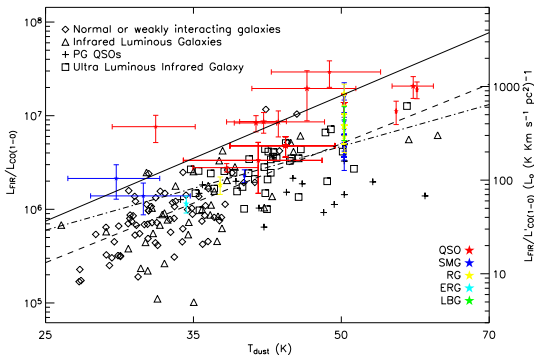


relation non-linéaire :

$$\log L_{\text{FIR}} = (-2.5 \pm 0.1) + (1.46 \pm 0.01) \log L'_{\text{CO}}$$



Efficacité de formation stellaire



théorie : $L_{\text{FIR}}/L'_{\text{CO}} \propto T_{\text{dust}}^{3+\beta}$

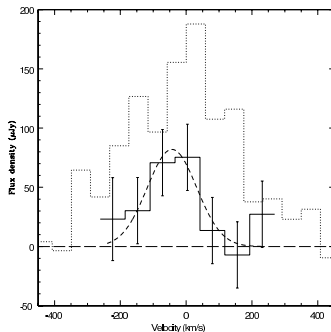
$$\log L_{\text{FIR}}/L'_{\text{CO}} = (-4.8 \pm 0.4) + (4.2 \pm 0.3) \log T_{\text{dust}}$$



HCN à grand-z

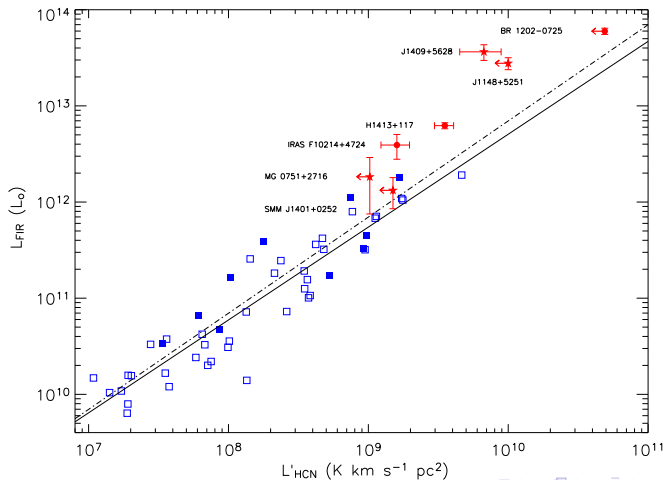
Carilli et al. 2004

- Observations de 4 sources
 - 1 détection
(J1409+5628 à $z = 2.58$)
 - $M_{\text{dense}} \approx 5 \times 10^{10} M_{\odot}$
- Total de 7 sources observées
 - 3 détections



HCN à grand-z - Efficacité de formation stellaire

Carilli et al. 2004

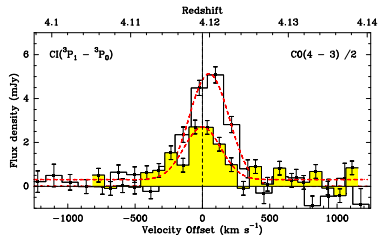


Gaz atomique dans Pss 2322+1944

Pety, Beelen, Cox et al. 2004

● Détections CI

- **Pss 2322+1944** $z = 4.1$
- $M_{\text{CI}} = 1.2 \times 10^7 M_{\odot}$



● Total de 4 sources détectées

- Cloverleaf $z = 2.5$
- F10214 $z = 2.3$
- SMM 14011 $z = 2.6$



Gaz atomique dans Pss 2322+1944

Pety, Beelen, Cox et al. 2004

- Abondances
 - $[\text{C I}/\text{H}_2] \sim 3 \times 10^{-5} M_{\odot}$
- Refroidissement
 - Pss 2322+1944 : $\text{CO}/\text{C I} = 7$
 - Cloverleaf : $\text{CO}/\text{C I} = 20$
- **Enrichissement rapide du milieu**



Conclusions

- Observations continuum de plus de **120 sources**
 - QSOs **optiquement faibles**
 - $L_{\text{FIR}} \sim 10^{13}$ FIR, $M_{\text{dust}} \sim 10^8 M_{\odot}$
 - sonder la formation stellaire $\sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}^{-1}$
- Corrélation infrarouge-optique
 - Liens entre **formation stellaire et trous noirs supermassifs**
- **Formation de la poussière** à grand décalage spectral ?
- Étude du gaz moléculaire dans J1409+5828
- **Efficacité de formation stellaire** à grand-z
- **Gaz dense** et **gaz atomique** à grand décalage spectral



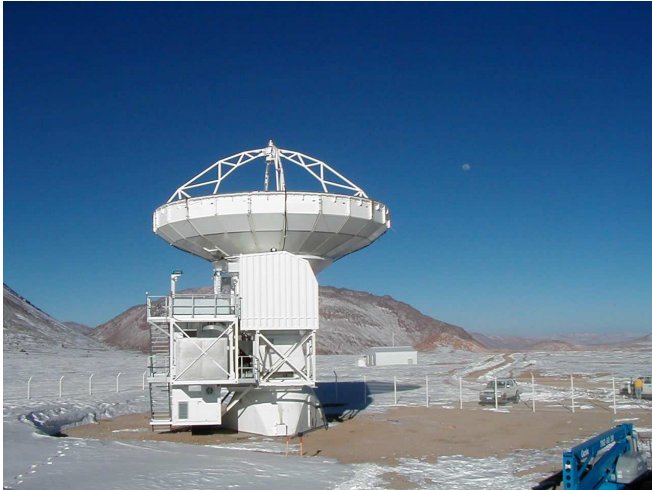
Perspectives

- **Nature du lien trou noir supermassif/formation stellaire ?**
 - équivalent local ?
 - évolution avec z ?
- **Caractériser les SEDs individuelles**
 - modélisation de l'émission de l'optique à la radio
 - rôle du NAG ?
- **Formation de la poussière**
 - augmenter la statistique
 - mécanisme de production ?
 - implication pour la réionisation ?



Perspectives

- Étude du milieu interstellaire à grand-z !!
- Raies de CO non détectées ?
 - décalage spectral ?
- Nouvelles espèces
 - gaz dense, gaz atomique
 - modélisation LVG/PDR
- Résolution des sources
 - masse dynamique



MERCI !

- Pierre Cox
- Nabila Aghanim
- Matej Langer
- Alain Abergel
- Jean-Loup Puget
- thesards@ias
- postdocs@ias
- tous@ias
- A. Omont, N. Mohan
- F. Bertoldi
- C. Carilli
- J. Pety, R. Neri, A. Weiß
- K. Isaak
- X. Fan
- A. Petric
- D. J. Benford

