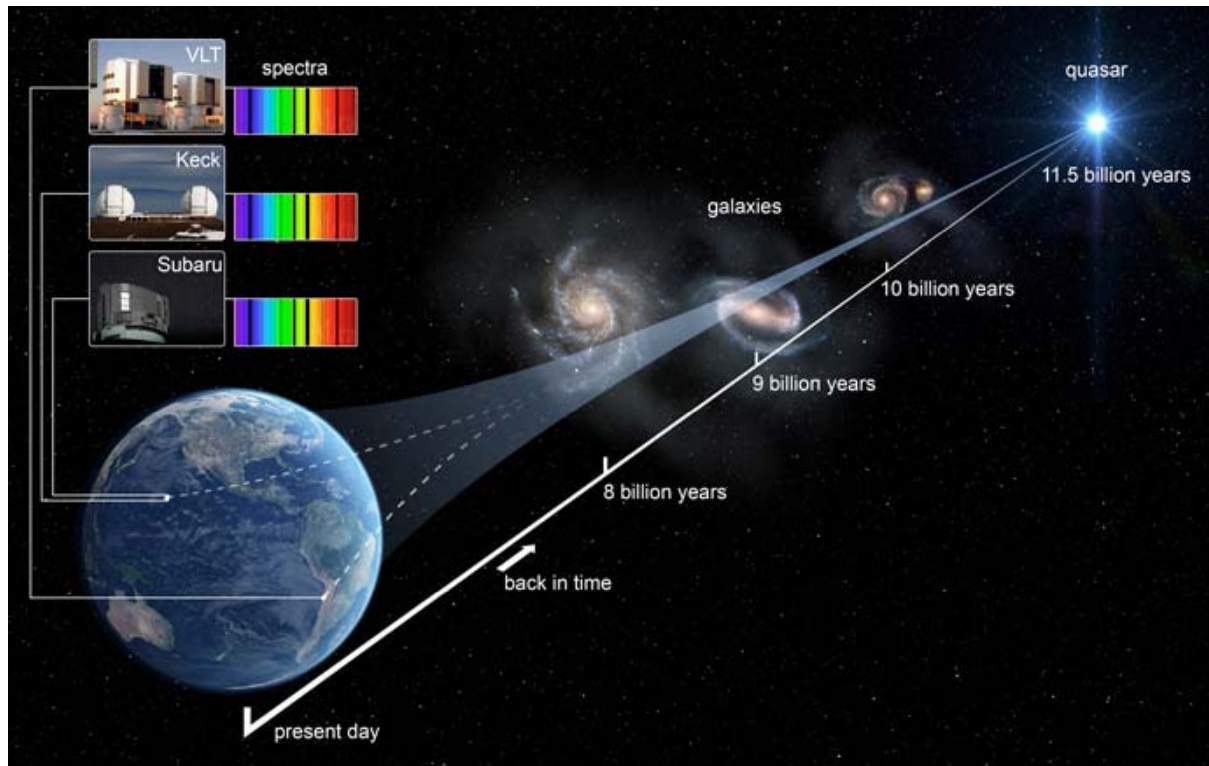




COLLÈGE
DE FRANCE
— 1530 —

Chaire Galaxies et Cosmologie

Variations des constantes

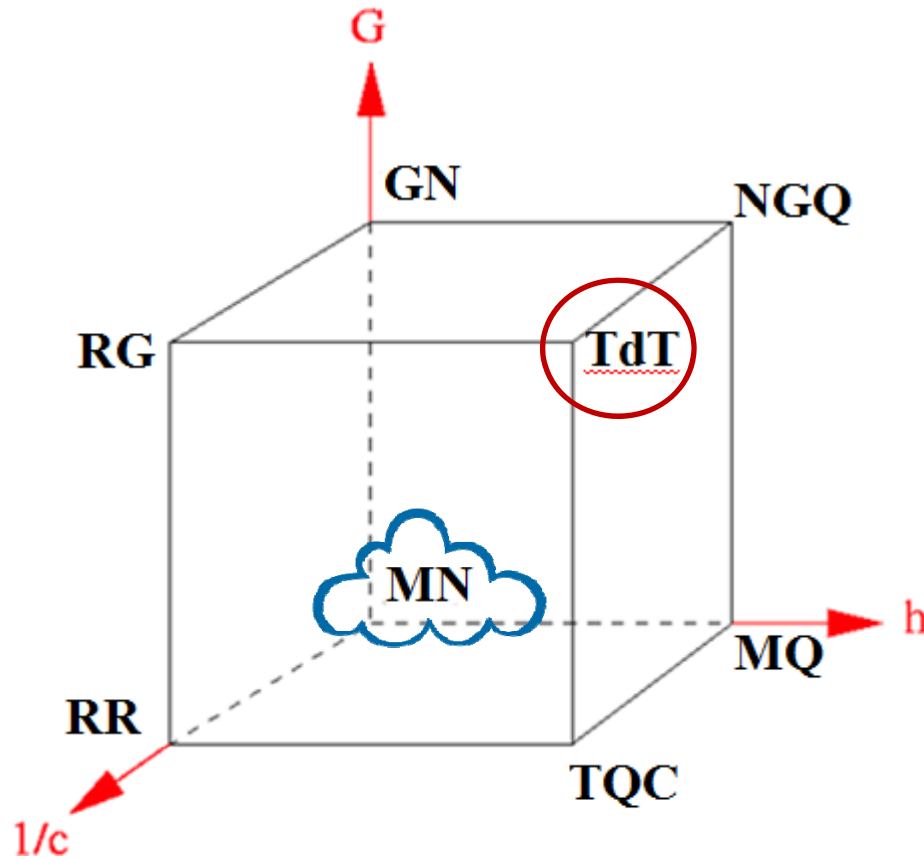


Françoise Combes



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

Les constantes G, h, c



MN Mécanique Newtonienne

MQ Mécanique Quantique

RR Relativité Restreinte

GN Gravité Newtonienne

TQC Théorie Quantique des Champs

RG Relativité Générale

NGQ Non-rel Gravité Quantique

TdT: Théorie du tout

$G, h, c, m_e, m_p, m_n, e$

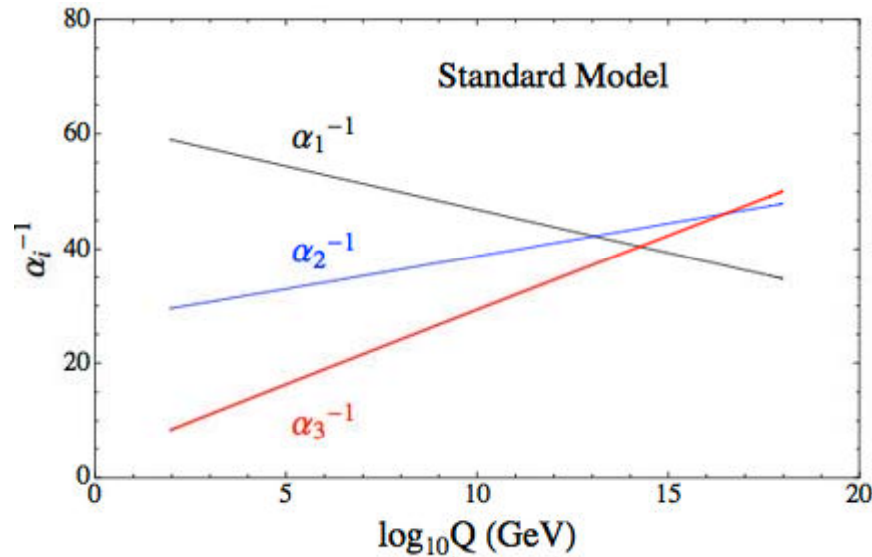
$$q^2 = e^2 / 4\pi\epsilon_0$$

Okun (1991)

$$\alpha = q^2 / \hbar c, \quad \alpha_W = G_F m_p^2 c / \hbar^3, \quad \alpha_s = g_s^2 / \hbar c, \quad \alpha_G = G m_p^2 / \hbar c$$

$$\mu = m_e / m_p, \quad \mathbf{x} = g_p \alpha^2 \mu, \quad \mathbf{y} = g_p \alpha^2$$

Unification, et variation des constantes



Le couplage QCD explique la masse des particules

Aussi le rapport $\mu = m_p/m_e$ doit varier

→ relations entre $\delta\mu/\mu$ et $\delta\alpha/\alpha$

Les diverses théories prévoient des variations différentes

- ▶ Dilaton, chameleon, branes, extra-dimensions, quintessence
- ▶ Modèle à masse variable des neutrinos
- ▶ Gravité quantique à boucles
- ▶ Énergie noire holographique

Lien avec le principe d'équivalence

Si les constantes varient dans l'espace, alors cela viole l'universalité de chute libre (UFF) *Dicke (1960)*

La masse d'un objet est la somme des masses des particules qui le composent, avec aussi une énergie de liaison $m(\alpha_i)$

Celle-ci dépend des forces fortes, ou faibles ou EM, donc des constantes de couplage α_i

$$f_{A,i} \equiv \frac{\partial \ln m_A}{\partial \alpha_i}$$

Variation de la masse du corps A

Si les constantes α_i varient avec le temps

→ Accélération qui dépendra de la composition chimique du corps

Variations dépendront du modèle d'Univers Λ CDM

◆ Relativité d'Einstein, ◆ Contenu de l'Univers ($\Omega_m, \Omega_\Lambda, \dots$)

◆ Symétrie supposée, ◆ Topologie supposée

Champ scalaire de quintessence → provoque la variation des α

Variation des Constantes

➡ L'idée de la variation de G remonte à Dirac (1937)

Gravité faible $Gm_p^2/hc \sim 10^{-40}$ $T m_p c/h \sim 10^{40}$

Théorie par Jordan (1937, 39); forces autres que la gravité

➡ problèmes géologiques avec la variation de G
résolus si masse électron-proton varie, ou charge e
(Gamow 1967)

➡ Landau (1955) relation avec la re-normalisation en QED



Théories motivant cette variation

Kaluza-Klein (Kaluza 1919, Klein 1926) 5ème dimension

Unification des forces avec la gravité (supercordes, 10Dim)

ST gravités avec graviton (spin 2) + autre champ (spin 0), couplage universel avec la matière, pour conserver UFF (Brans-Dicke)

M-theory, rassemblant les 5 théories de cordes

(Ed. Witten 1995)

couplage dilaton-graviton: occasion de tester plus précisément
le principe d'équivalence (*Damour & Polyakov 1994*)



Ed. Witten

variation de α à différentes échelles temporelles (10^{10} ans Big-Bang)

→ variations spatiales (*test dans l'univers observable*)

Dimensions spatiales supplémentaires, compactifiées à petite échelle
Cstes de couplage dans notre univers 3D reliées à la taille de ces
dimensions additionnelles, qui varient en fonction du temps

$$\alpha = e^2 / \hbar c$$

$$\alpha/G \sim t^n$$

$$d\alpha/dt/\alpha \sim dG/dt/G \sim 10^{-11} / \text{an} \quad \text{âge de l'Univers} \sim 1.4 \cdot 10^{10} \text{ ans}$$

1ère théorie cohérente: *Bekenstein 1982*

$$d\alpha/dt/\alpha \ll H_0$$

champ scalaire, variation de e

→ Variation de la vitesse c ?

Avantages: résoudre les pbs

platitude de l'Univers, l'horizon

Λc^2 varie (*Barrow & Magueijo 2000*)

variation de c s'arrête dans l'ère
de la matière $10^{-5} H_0$ à $z \sim 1$

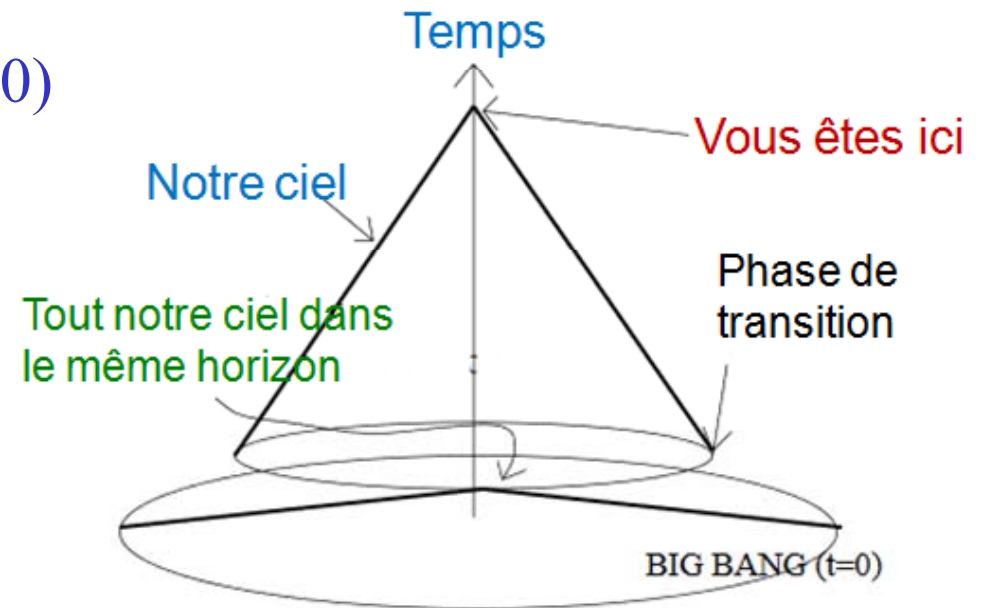
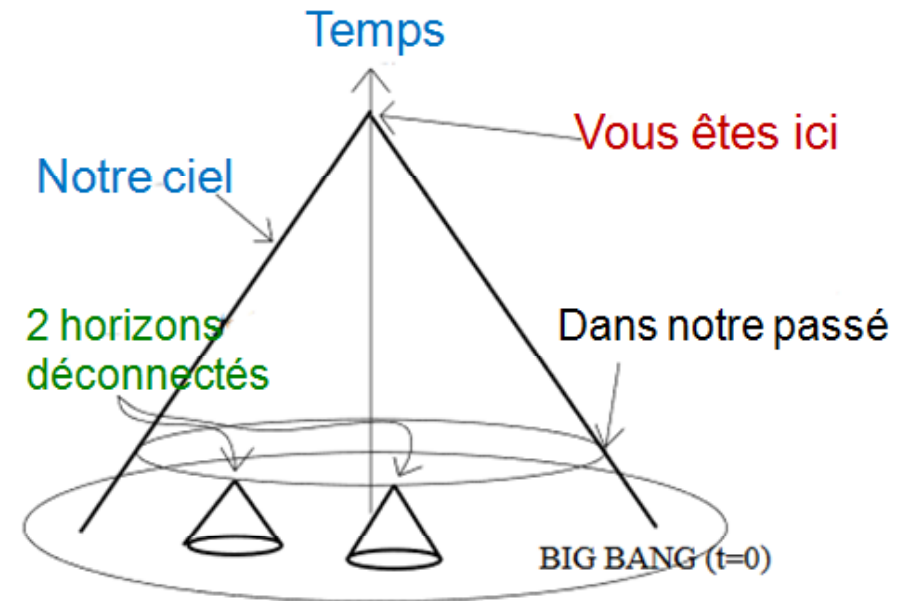
Variations périodiques de α

(*Hill & Ross 1988*)

ou bien **champ scalaire**

aux oscillations amorties

→ **Voir Revue de J-P Uzan (2011)**



Rapports sans dimensions

Quantité	Rapport	Valeur	Relié à
α_{EM}	$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c}$	1/137.03599976	Force électromagnétique
α_{W}	$\frac{G_{\text{F}}m_{\text{p}}^2c}{\hbar^3}$	1.03×10^{-5}	Force nucléaire faible
$\alpha_{\text{S}}(E)$	$\frac{g_{\text{s}}^2(E)}{\hbar c}$		Force nucléaire forte
α_{G}	$\frac{Gm_{\text{p}}^2}{\hbar c}$	5×10^{-39}	Gravitation
μ	$\frac{m_{\text{e}}}{m_{\text{p}}}$	5.44617×10^{-4}	
x	$g_{\text{p}}\alpha_{\text{EM}}^2\mu$	1.62×10^{-7}	
y	$g_{\text{p}}\alpha_{\text{EM}}^2$	2.977×10^{-4}	

Variation des masses des particules

La masse d'un atome varie avec les constantes de couplage

$$m(Z, A) = Z m_p + (A-Z) m_n + Z m_e + E_S + E_{EM} = m(\alpha_i)$$

Encore plus vrai avec la masse des protons et neutrons

$$m_p = c_{QCD} \Lambda_{QCD} + c_u m_u + c_d m_d + c_{em} \alpha_{em}$$

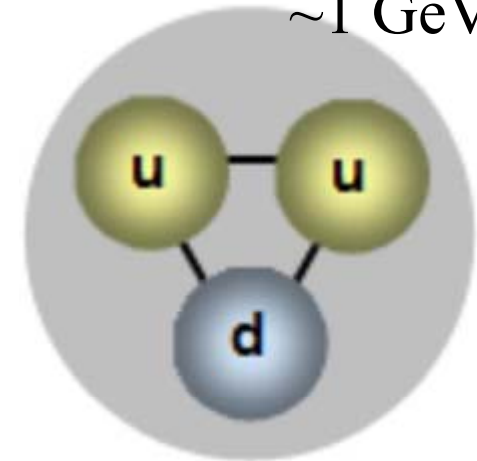
$$m_p \sim c_{QCD} \Lambda_{QCD}$$

A qq % près, la masse du proton ne dépend que de l'énergie de liaison, et donc dépend de l'évolution du couplage QCD

$$\frac{\dot{m}_p}{m_p} \simeq \frac{\dot{\Lambda}_{QCD}}{\Lambda_{QCD}} \quad \alpha_s(\mu_R) = \frac{4\pi}{(11 - 2n_f/3) \ln(\mu_R^2/\Lambda_{QCD}^2)}$$

Constante de couplage force forte α_s , μ_R échelle de renormalisation
nf nombre de saveurs de quarks

Proton
 ~ 1 GeV



Modèle standard des particules



Peter Higgs

		Particules de matière (fermions)			Particules d'interactions		boson de masse	
		I	II	III				
QUARKS	2.4 MeV +2/3 1/2 u up	1.27 GeV +2/3 1/2 c charm	171.2 GeV +2/3 1/2 t top	0 0 1 γ photon	125 GeV 0 0 H boson de Higgs			
	4.8 MeV -1/3 1/2 d down	104 GeV -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon				
	<2.2 eV 0 1/2 ν_e neutrino électronique	<0.17 MeV 0 1/2 ν_μ neutrino muonique	<15.5 MeV 0 1/2 ν_τ neutrino tauique	91.2 GeV 0 1 Z⁰ boson Z				
LEPTONS	511 KeV -1 1/2 e électron	105.7 MeV -1 1/2 μ muon	1.777 GeV -1 1/2 τ tau	80.4 GeV ±1 1 W[±] bosons W				

BOSONS DE JAUGE		boson H	
nom	spin	charge électrique	masse
			125 GeV
			0
			0
			0
			H
			boson H

Succès du modèle standard

L'électrodynamique quantique (QED) rencontre un parfait succès avec toutes les observations

Les tests de précision ont déterminé la constante de structure fine α

$$\alpha^{-1} = \frac{hc}{e^2} = 137.035999676(94)$$

Les mesures les plus précises viennent du facteur g de l'électron

Prenant en compte le **Lamb-shift**

$$\vec{\mu} = g_e \frac{e\hbar}{2m_e c} \vec{s}$$

$$g = 1 \text{ classique}$$

$$= 2 \text{ Dirac}$$

$$= 2.00231930436(15) \text{ QED}$$

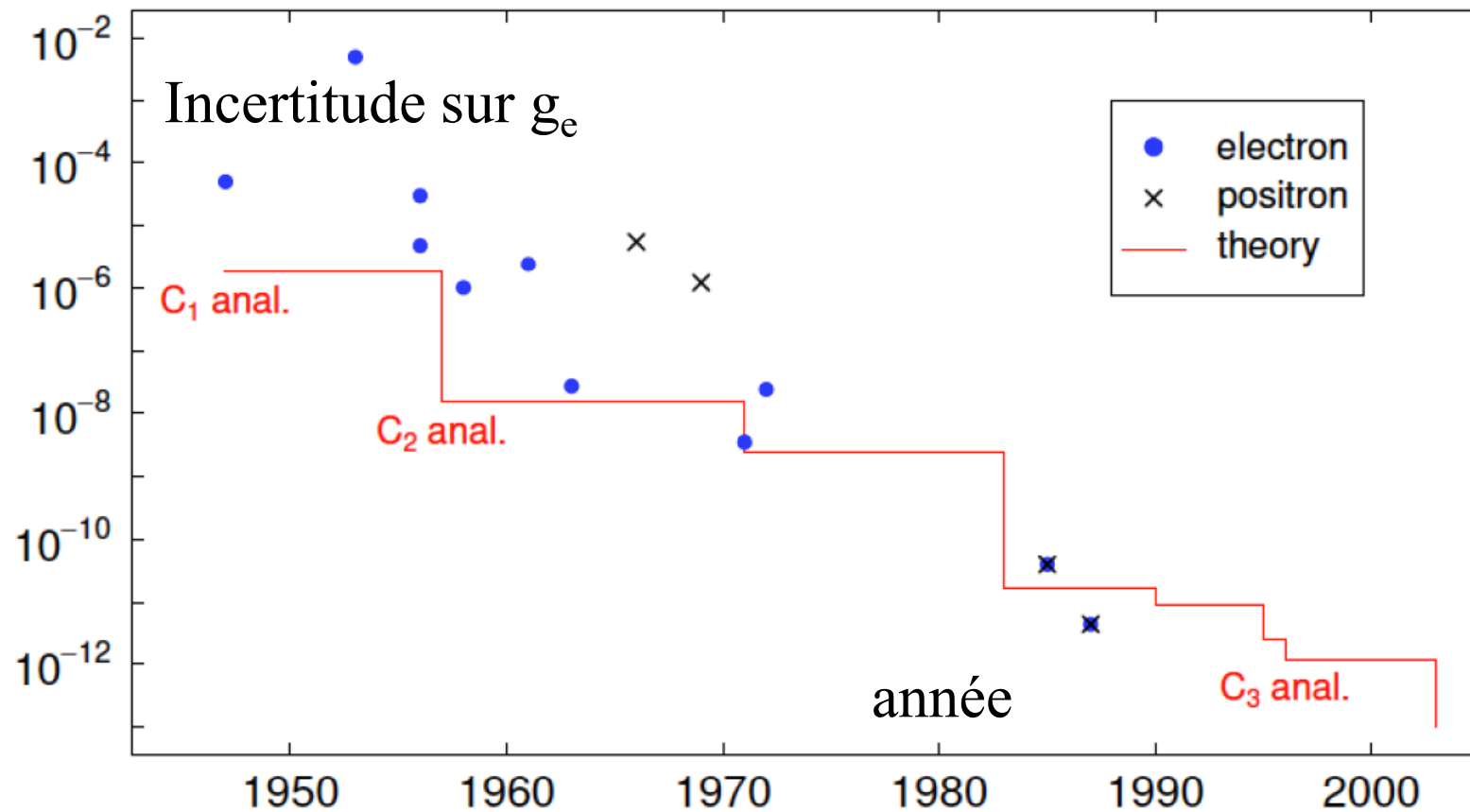
$$\nu_c = eB/(2\pi m)$$

Provient de l'interaction avec les fluctuations du vide

Mesure des constantes en labo

$$\mu = -g \frac{e\hbar}{2m} \frac{\mathbf{S}}{\hbar}$$

$$a_e(\text{QED}) = \frac{g_e - 2}{2} = C_1 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right) + C_2 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^2 + C_3 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^3 + C_4 \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^4 + \dots$$



Odom et al (2006)

Lagrangien du Modèle Standard

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \underbrace{-\frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} - \frac{1}{8}tr(\mathbf{W}_{\mu\nu}\mathbf{W}^{\mu\nu}) - \frac{1}{2}tr(\mathbf{G}_{\mu\nu}\mathbf{G}^{\mu\nu})}_{\text{Jauges U(1), SU(2), SU(3)}} \\
 & \underbrace{+(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R \sigma^\mu iD_\mu e_R + \bar{\nu}_R \sigma^\mu iD_\mu \nu_R}_{\text{terme dyn lepton}} \\
 \text{QED} & \underbrace{-\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \phi M^e e_R + \bar{e}_R M^{e*} \bar{\phi} \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} \right]}_{\text{Masse de e-, mu, tau}} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{e}_L, \bar{\nu}_L) \phi^* M^\nu \nu_R + \bar{\nu}_R M^{\nu*} \phi^T \begin{pmatrix} -e_L \\ \nu_L \end{pmatrix} \right] \text{Masse neutrinos} \\
 & +(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \tilde{\sigma}^\mu iD_\mu \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} + \bar{u}_R \sigma^\mu iD_\mu u_R + \bar{d}_R \sigma^\mu iD_\mu d_R \text{terme dyn quark} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(\bar{u}_L, \bar{d}_L) \phi M^d d_R + \bar{d}_R M^{d*} \bar{\phi} \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \right] \text{Masse de quarks d, s, b} \\
 & -\frac{\sqrt{2}}{v} \left[(-\bar{d}_L, \bar{u}_L) \phi^* M^u u_R + \bar{u}_R M^{u*} \phi^T \begin{pmatrix} -d_L \\ u_L \end{pmatrix} \right] \text{Masse de u, c, t} \\
 & +\overline{(D_\mu \phi)} D^\mu \phi - m_h^2 [\bar{\phi} \phi - v^2/2]^2/v^2, \text{terme dyn et masse du Higgs} \\
 & + \text{qqes termes Hermitiens conjugués}
 \end{aligned}$$

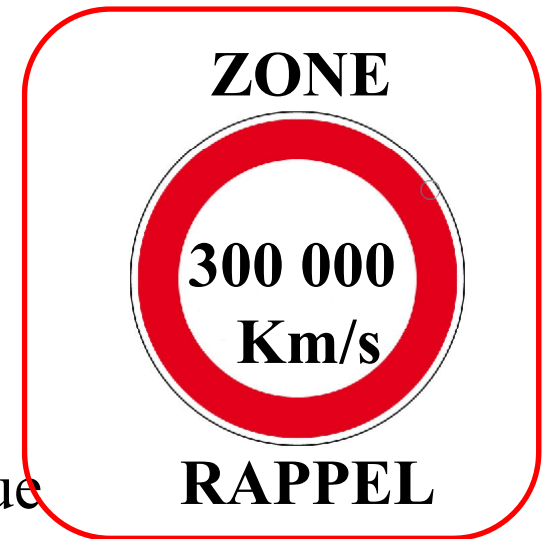
Variation de c ou de e?

Contrainte due aux trous noirs (Davies P. et al 2002)

$$A_H = 4\pi r^2 \text{ avec } r = G/c^2 [M + (M^2 - Q^2/G)^{1/2}]$$

$$SH = k\pi G/\hbar c [M + (M^2 - Q^2/G)^{1/2}]^2$$

Si α croît avec le temps, ce serait plutôt c qui diminue



Magueijo et al (2002) les variations de c (VSL) offrent une alternative à l'inflation (⚠️ équations de Maxwell, ppe variationnel, Ellis & Uzan 2005)

VSL prédisent une augmentation de α avec le temps, alors que les théories de variations de e (Barrow et al 2002, BSBM) prédisent une diminution

Les variations de α induisent une 5ème force (variations spatiales)

Dans le cas BSBM accélération dépendant de la composition

→ violation du principe d'équivalence faible (WEP)

(contraire aux expériences Eötvös)

Méthodes de mesure

➡ En laboratoire, horloges atomiques
 $d\alpha/dt/\alpha < 0.8 \cdot 10^{-16} / \text{an}$
temps d'horloge $1/\tau = E_e \alpha^2 / \hbar$ écarts sup dans
un puits de potentiel

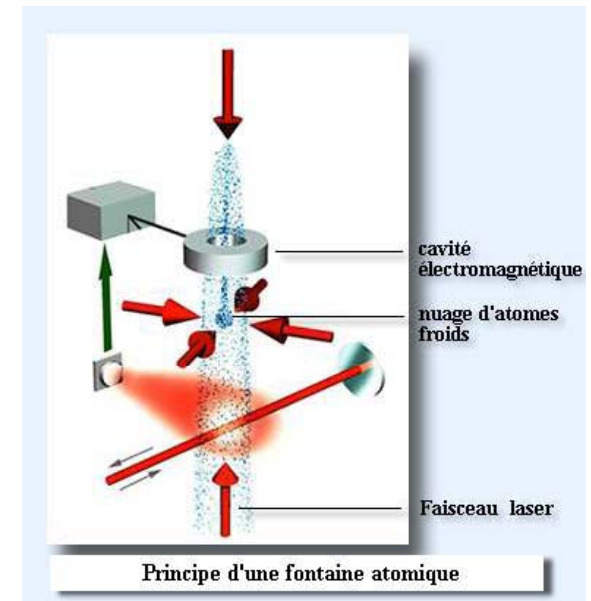
➡ Réacteur naturel d'OKLO (Gabon)
fission naturelle, il y a 1.8 milliard d'années
niveau de résonance nucléaire dans ^{150}Sm (*Damour & Dyson 1996*)

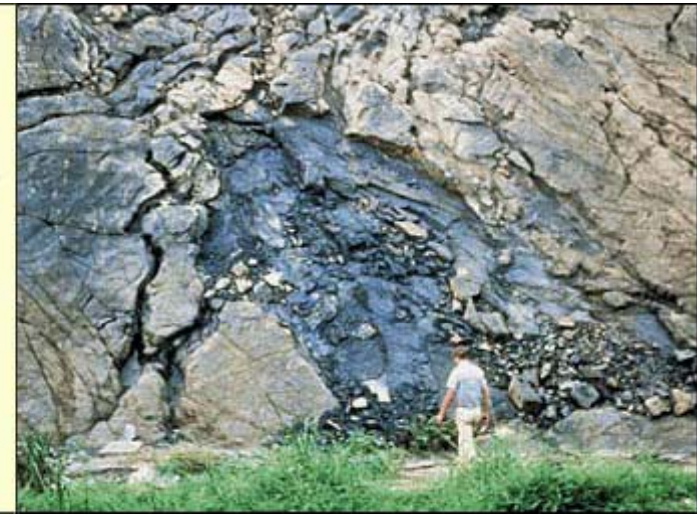
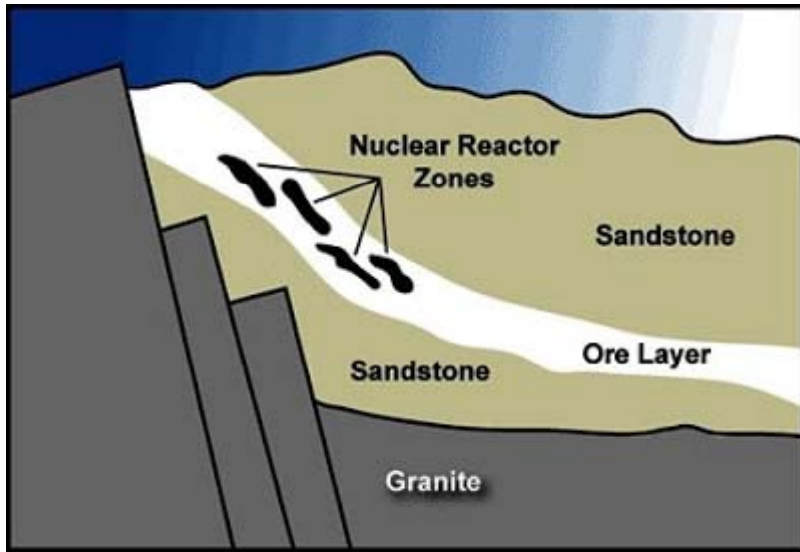
$$\Delta\alpha/\alpha < 1.2 \cdot 10^{-7}$$

Fujii et al (2000) $\Delta\alpha/\alpha < 0.04 \cdot 10^{-7}$

Mais: très faible redshift ($z \sim 0.1$) **Pas de test des variations spatiales**
+ Méthode isotopes radioactifs dans les météorites (âge du système
solaire, précision comparable, mais 2 fois plus vieux)

Olive et al (2002)



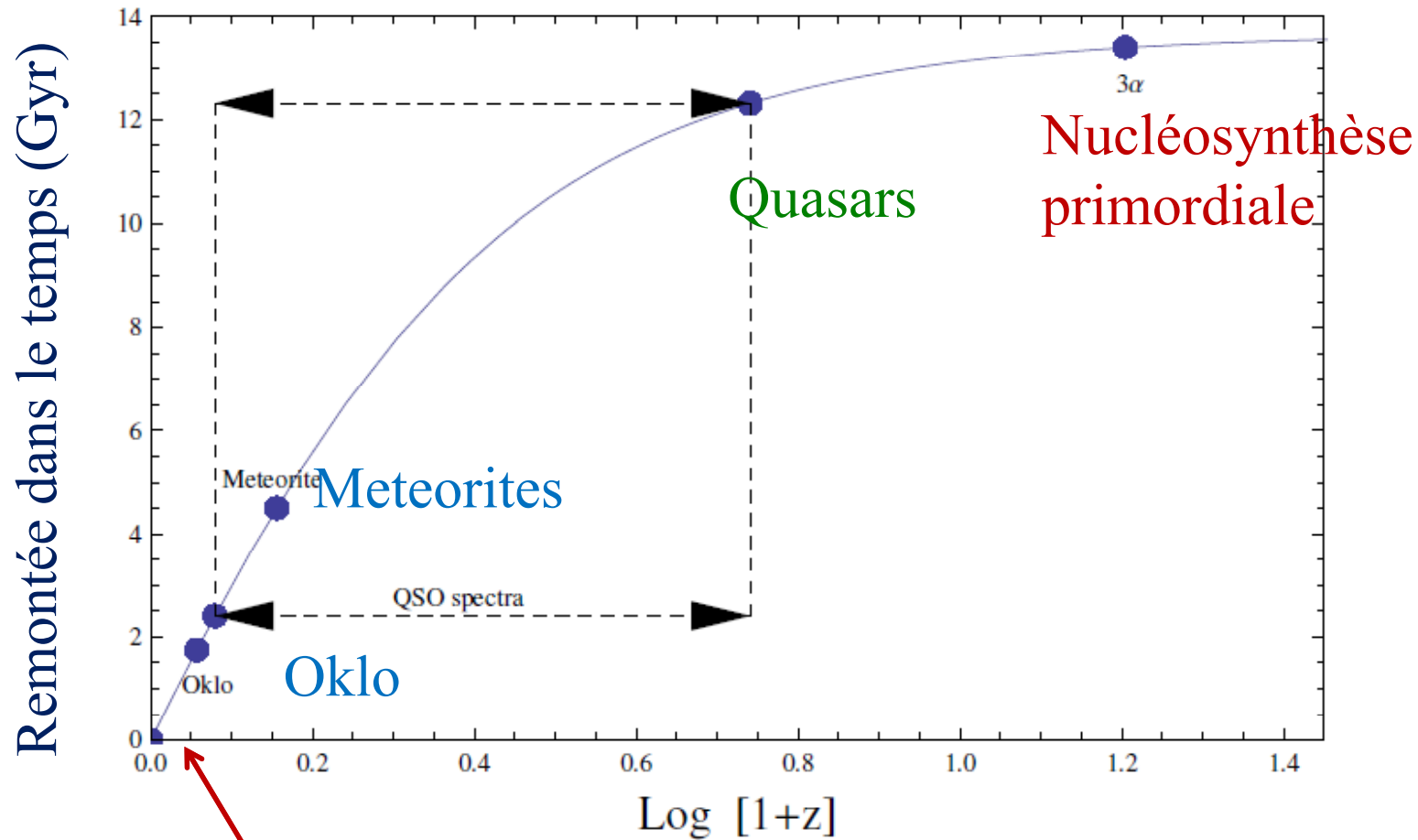


Le réacteur nucléaire
D'OKLO, au Gabon
Actif il y a 2 milliards
d'années

Découverte en 1972
dans l'Ur exploité par
le CEA

Fission de $^{235}\text{U} \rightarrow ^{236}\text{U}$
+ produits

Les diverses méthodes dans le temps



Laboratoire
aujourd'hui

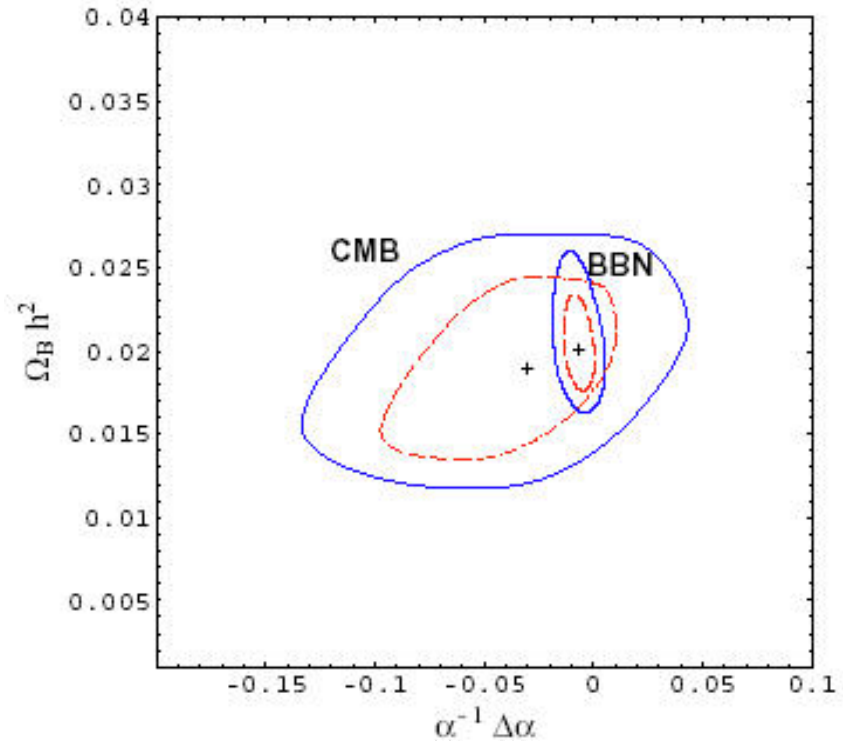
Contraintes CMB (fonds micro-onde) et BBN (nucléosynthèse)

Anisotropies du CMB ($z \sim 10^3$),
 C_1 ($\Omega_m, \Omega_b, h, \Delta\alpha/\alpha, n$)
(Avelino et al 2001)

Nucléosynthèse du Big Bang
(n/p différence de masse
barrière de Coulomb des
réactions nucléaires)
($z \sim 10^{10}$)

→ Pas de variations $\Delta\alpha/\alpha$
à $5 \cdot 10^{-2}$ près

Variations de α et m_e
changent la réionisation, et
les anisotropies

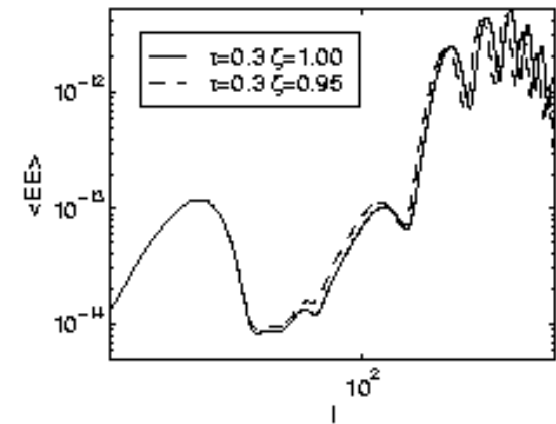
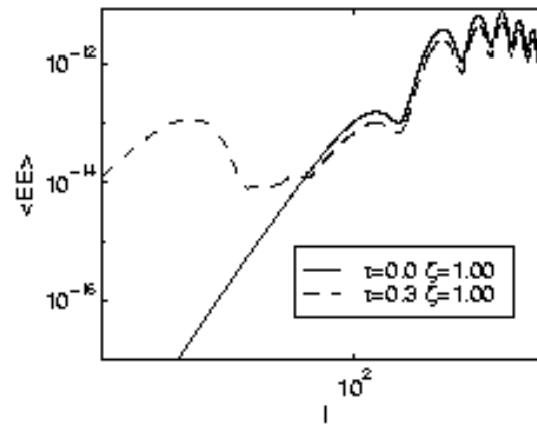
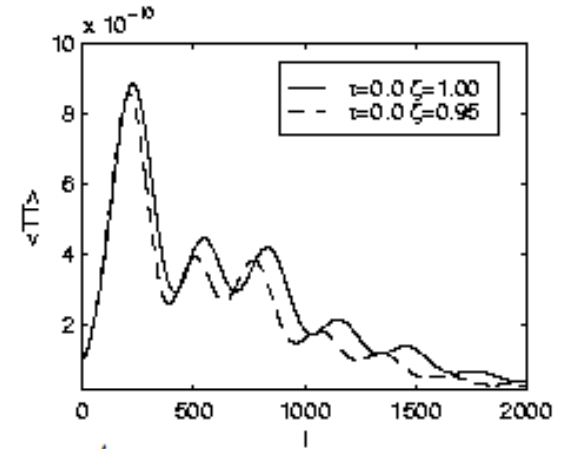
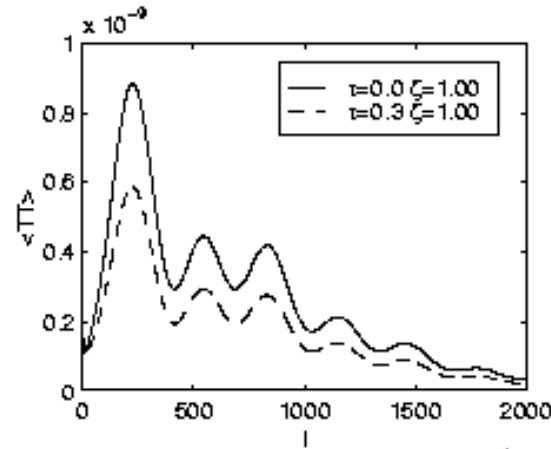
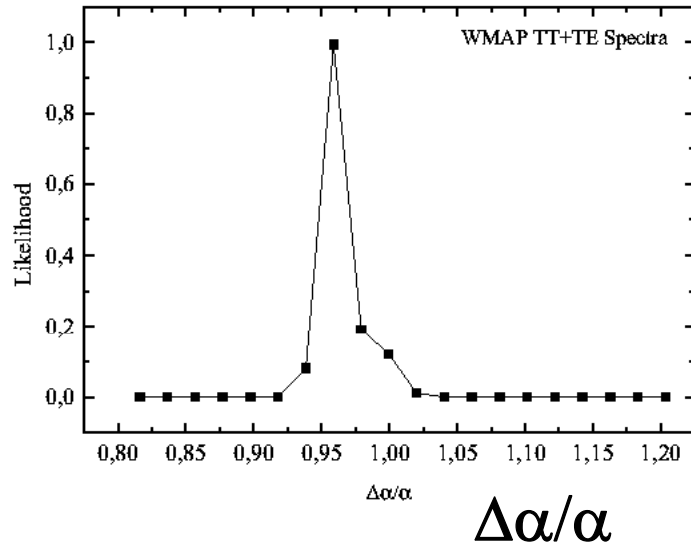


COBE, Boomerang
DASI

WMAP

$$\alpha^{-1} d\alpha/dt = -4.65 \times 10^{-13} \text{yr}^{-1}$$

$$\Delta\alpha/\alpha < 0.02$$

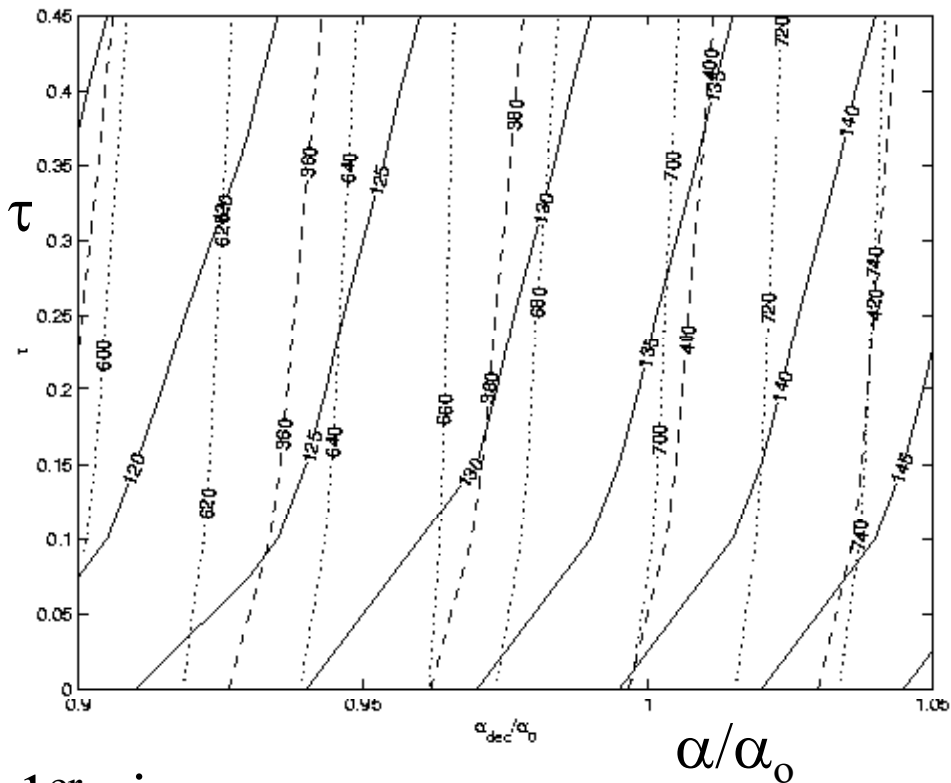


Contraintes sur α
 au moment de la
 Recombinaison
 $z_{rec}=1075$

Martins et al 2003, Stefanescu 2007

WMAP et réionisation

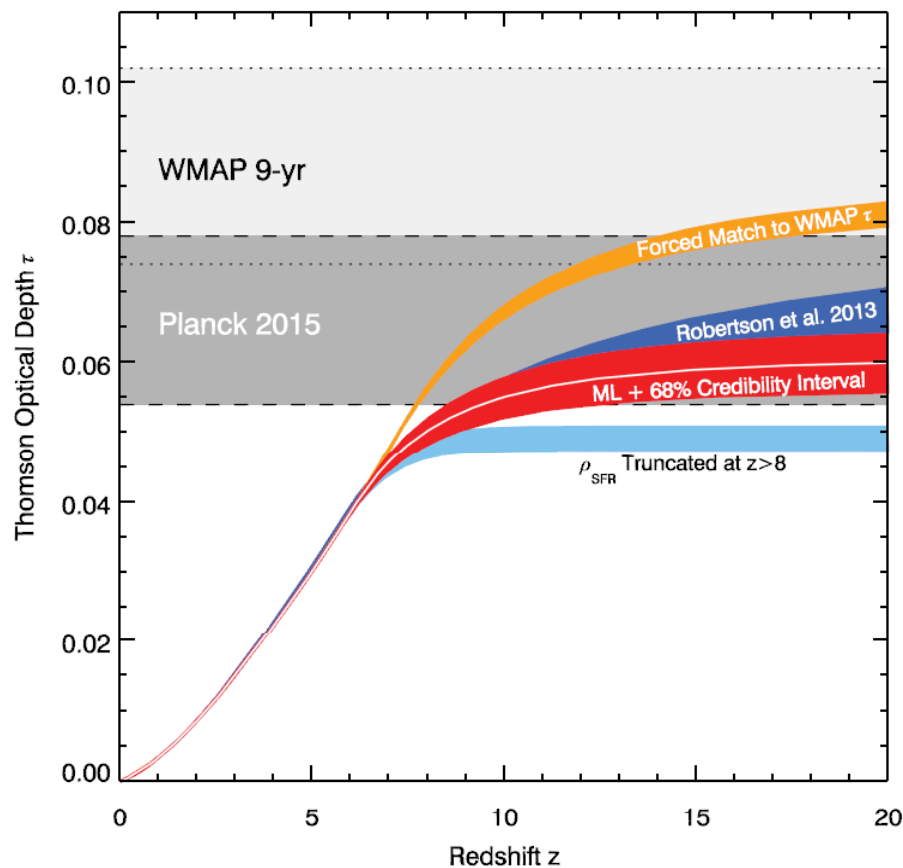
Séparation en l entre EoR et pics



- 1^{er} pic —————
- 2^e pic - - - - -
- 3^e pic

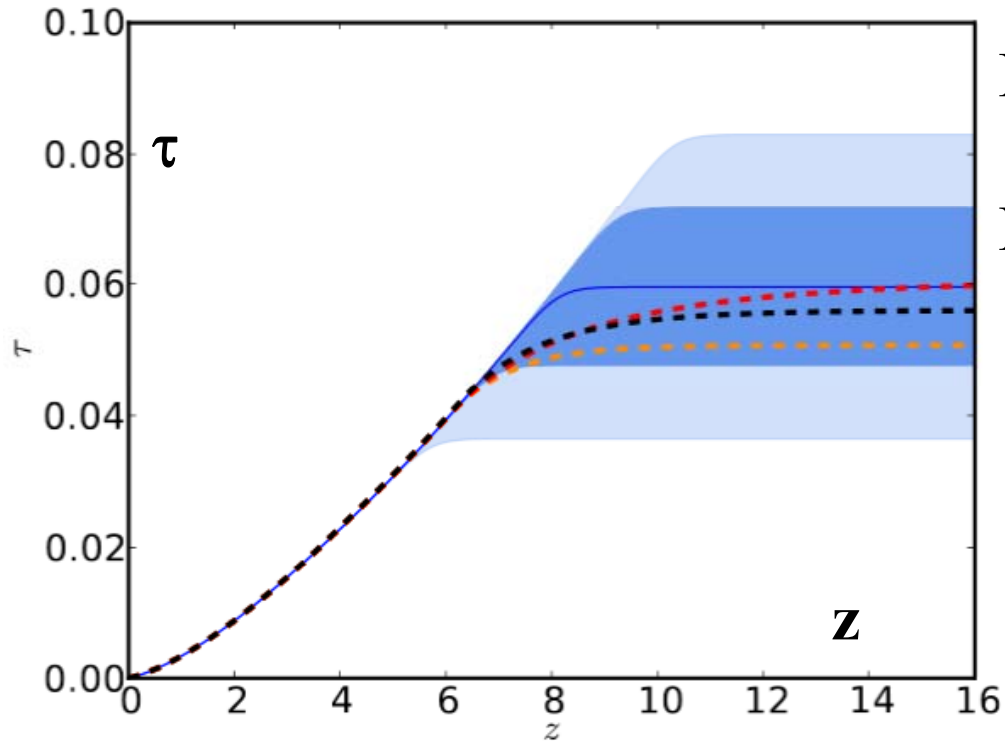
Avec le CMB, il est possible de mesurer α à 10^{-2} à $z=1000$

WMAP suggère une réionisation tôt dans l'Univers



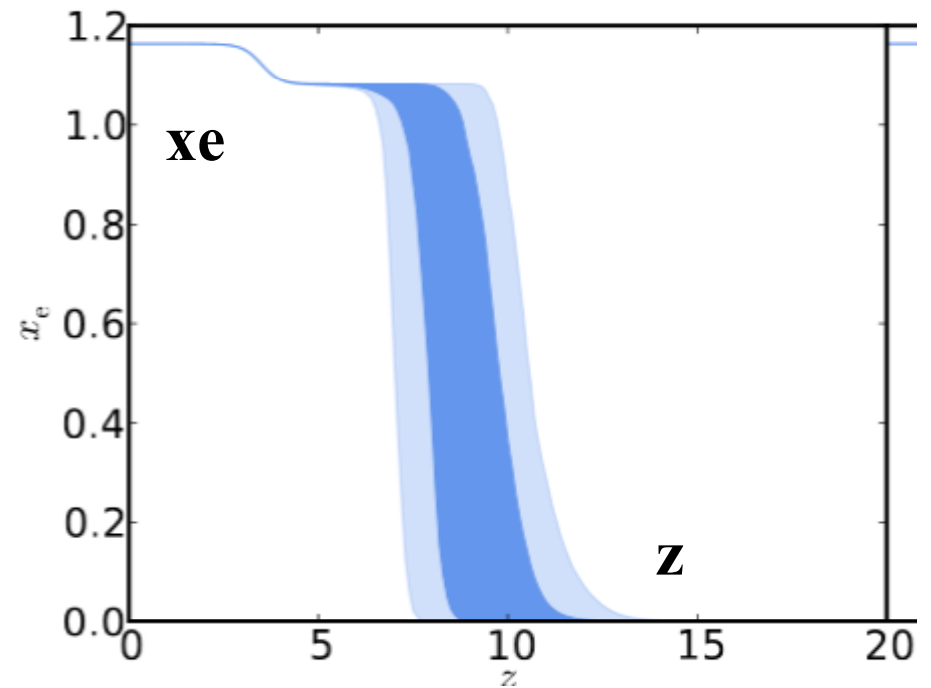
Robertson et al 2015

Nouvelle opacité d'après Planck



$$\tau = 0.058_{-0.012}^{+0.012}$$

Résultat beaucoup plus compatible avec le nombre de galaxies
Moins de galaxies à $z > 8$

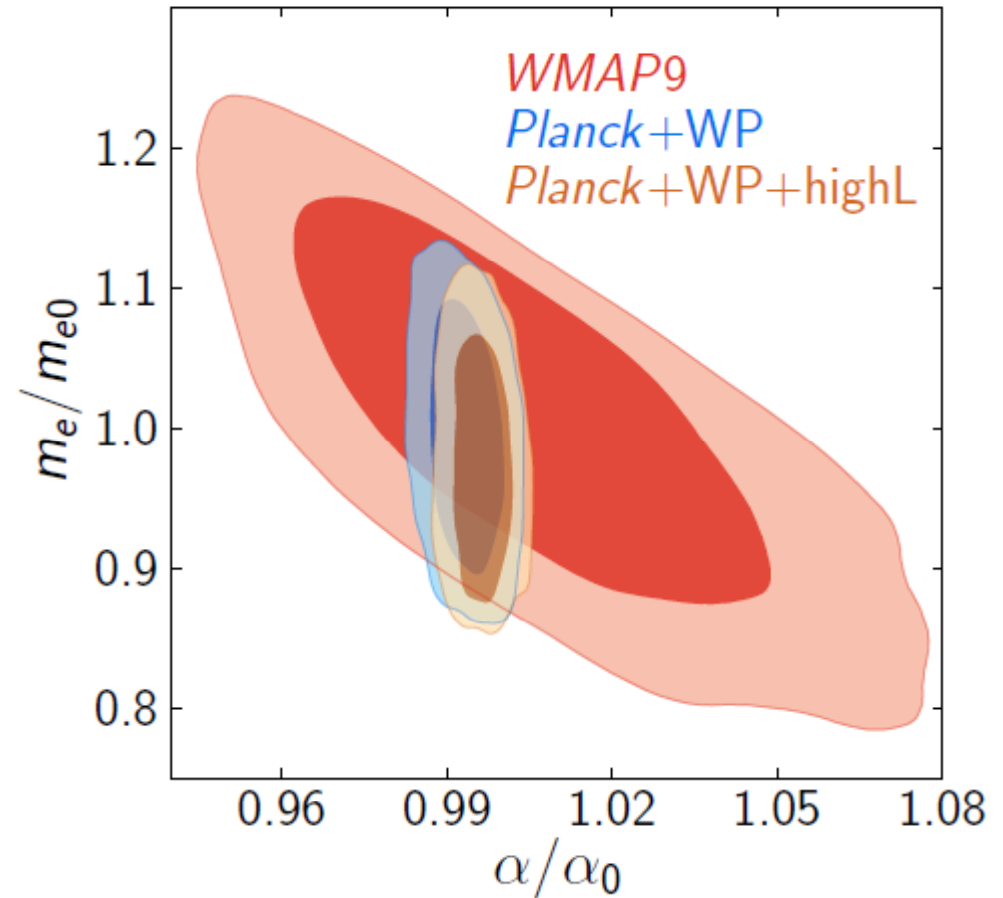
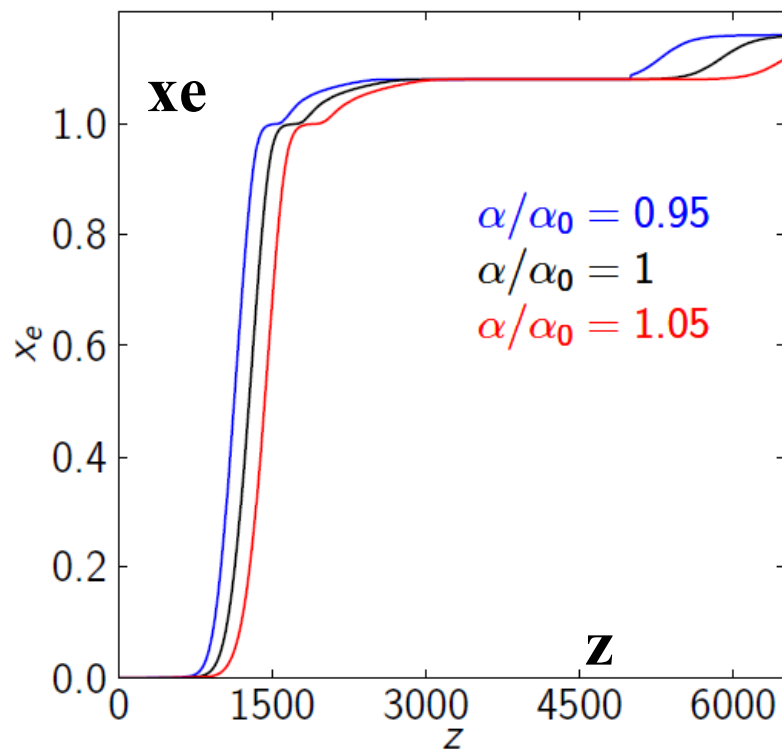


Histoire de la réionisation
Planck coll 2016

Meilleures limites avec Planck

$$\Delta\alpha/\alpha = (3.6 \pm 3.7) 10^{-3}$$

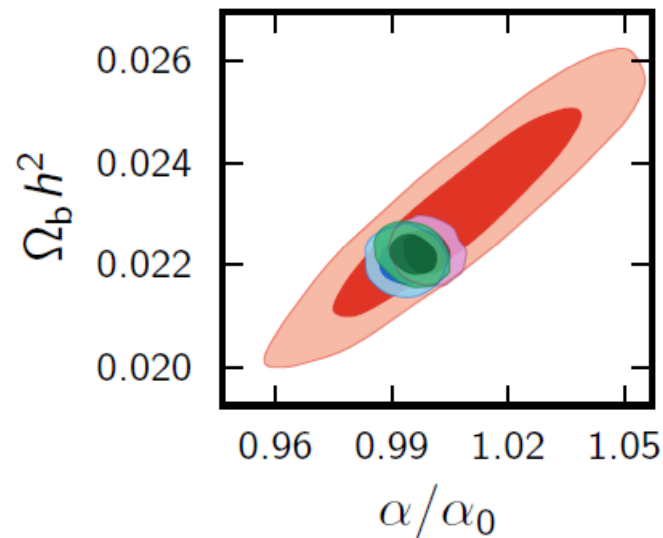
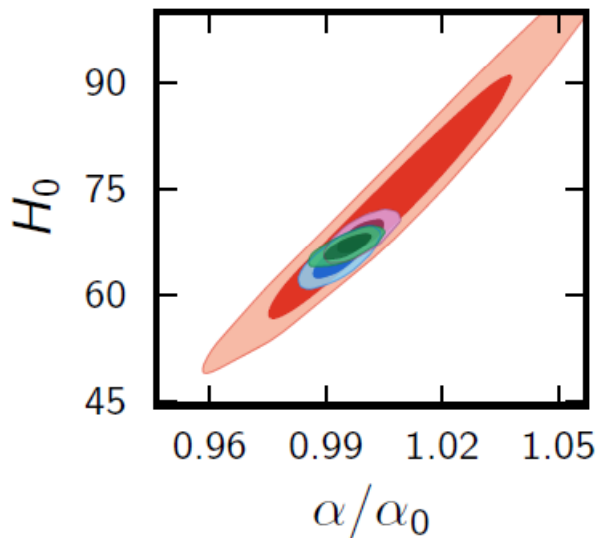
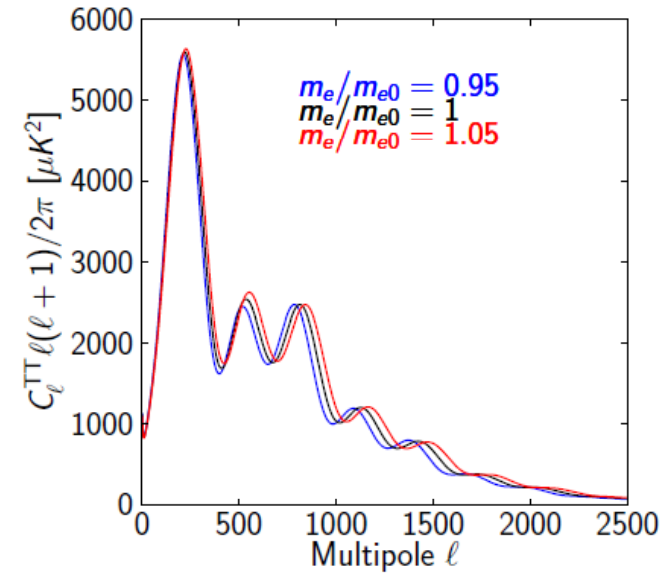
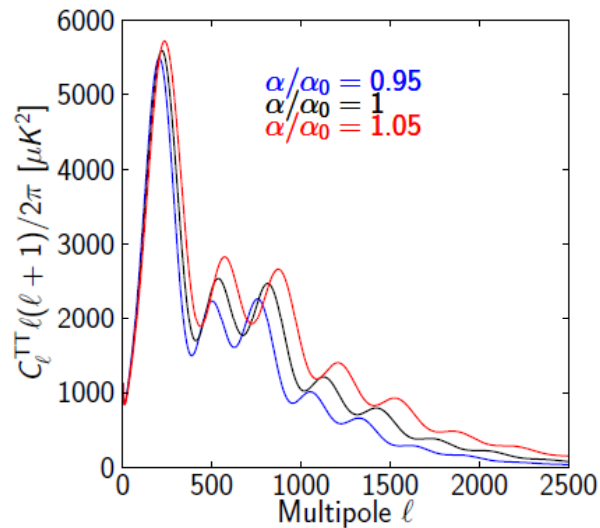
$$\Delta m_e/m_e = (4 \pm 11) 10^{-3}$$



WP: avec la polarisation de WMAP

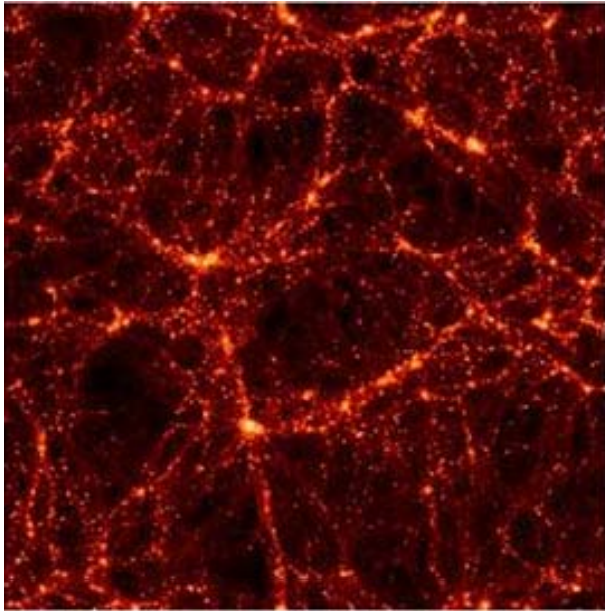
Planck coll 2015

Dégénérescence des paramètres?



*Planck Coll
2015*

Absorption devant les quasars

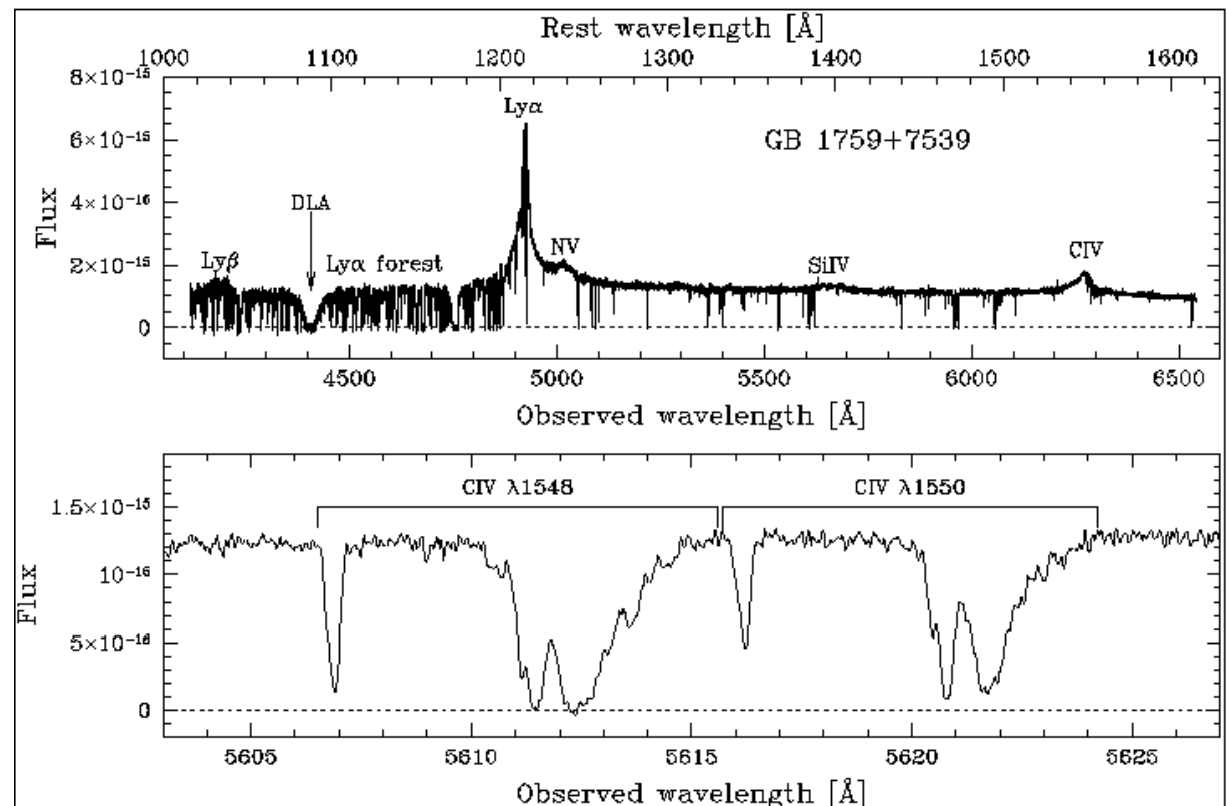


Les baryons suivent
la toile cosmique,
les filaments de matière
noire

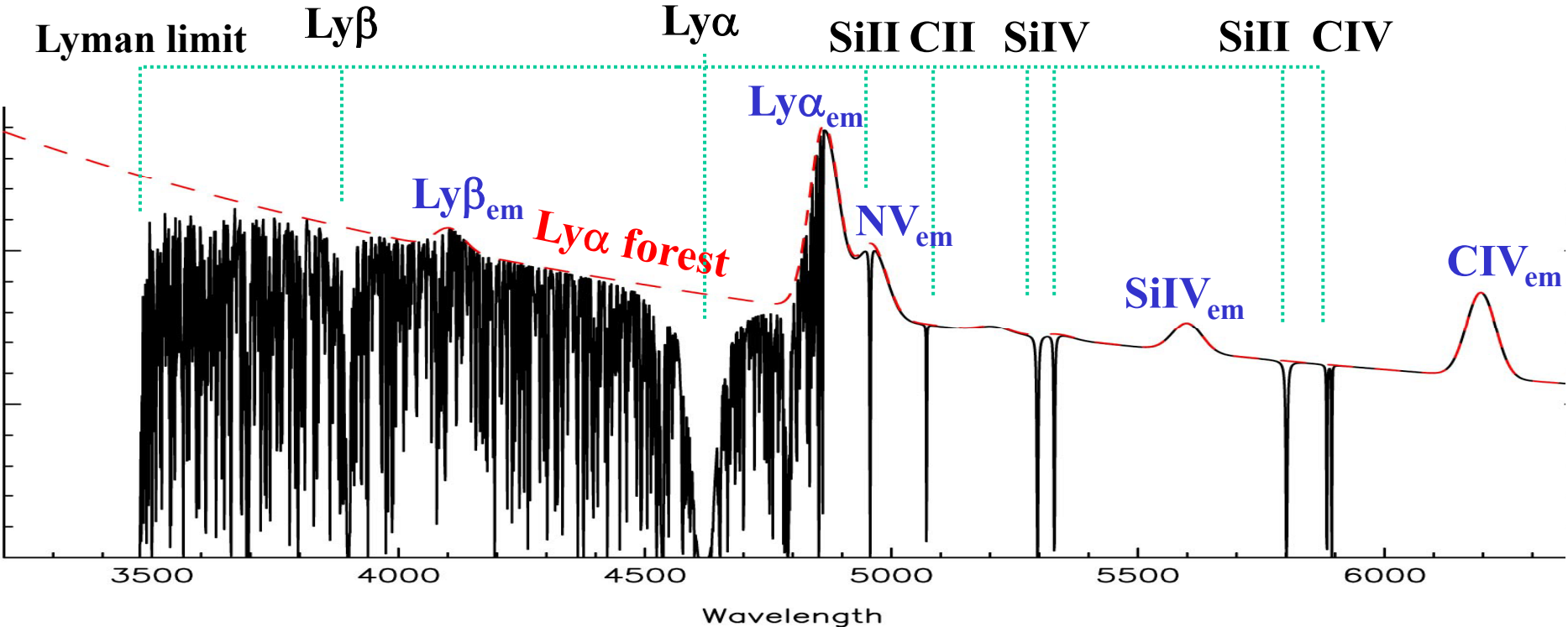
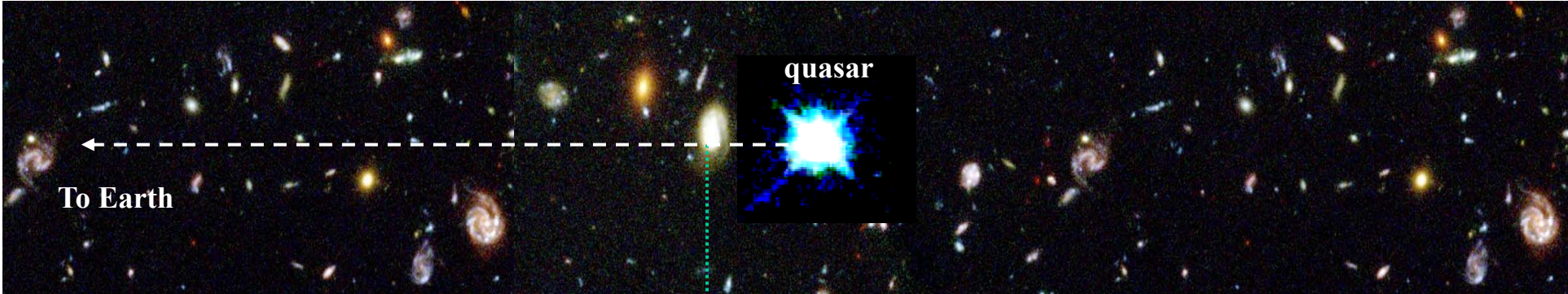
Ce réseau est
responsable d'une forêt
de raies d'absorption

La raie Ly α est très sensible
jusqu'à 10^{12}cm^{-2}

La forêt Lyman- α



Quasars: laboratoires de l'Univers

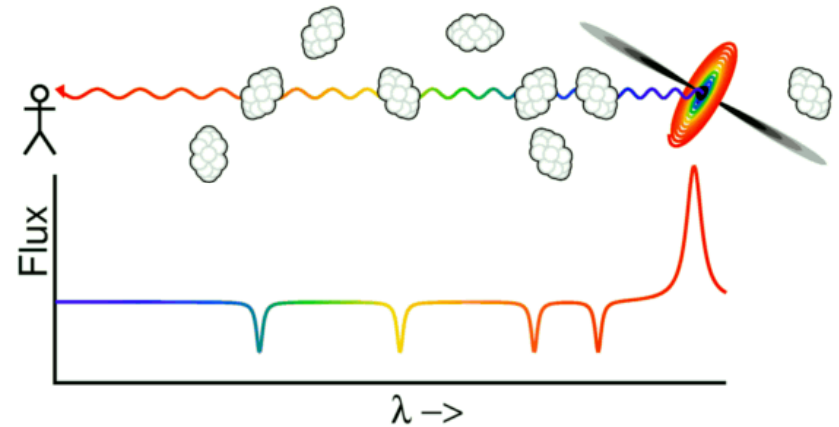


Raies d'absorption devant les quasars

Les quasars: astres les plus brillants

Remonter 95% de l'âge de l'Univers

Depuis Savedoff (1956): doublets



Les raies **d'absorption** sur la ligne de visée: **raies beaucoup plus fines**

Bahcall et al (1967) $\Delta\alpha/\alpha < 0.02$ à $z=1.95$ ($2 \cdot 10^9$ ans)

avec les doublets alcalins (CIV, SiII, SiIV, MgII, AlIII..) (**AD method**)

En 2000, $\Delta\alpha/\alpha < 4.6 \cdot 10^{-5}$ à partir de 16 systèmes d'absorption (6 QSOs)

Séparation du doublet en laboratoire → ajoute $\Delta\alpha/\alpha = 1.4 \cdot 10^{-5}$

Les transitions des atomes sont les mêmes dans le cas classique, mais la correction relativiste dépend du nbre atomique Z

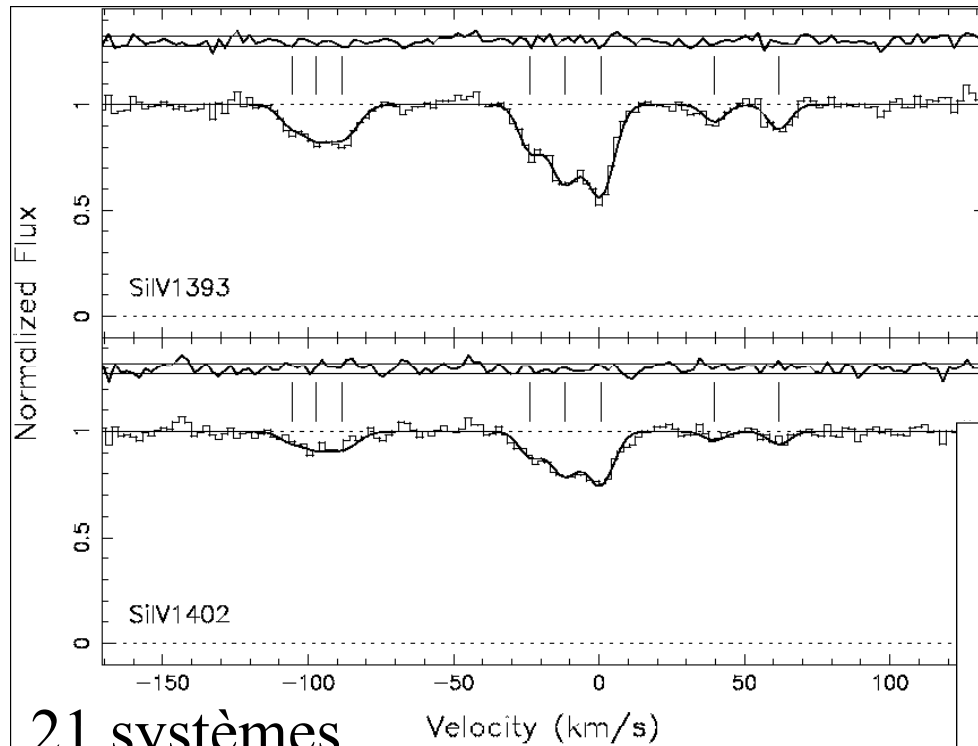
$$F_{\text{rel}}(\alpha_{\text{EM}}) = [1 - (Z\alpha_{\text{EM}})^2]^{-1/2} \left[1 - \frac{4}{3}(Z\alpha_{\text{EM}})^2 \right]^{-1} \simeq 1 + \frac{11}{6}(Z\alpha_{\text{EM}})^2$$

Méthode: Doublet Alcalin (AD)

$$\Delta\alpha/\alpha = (-0.5 \pm 1.3) 10^{-5}$$

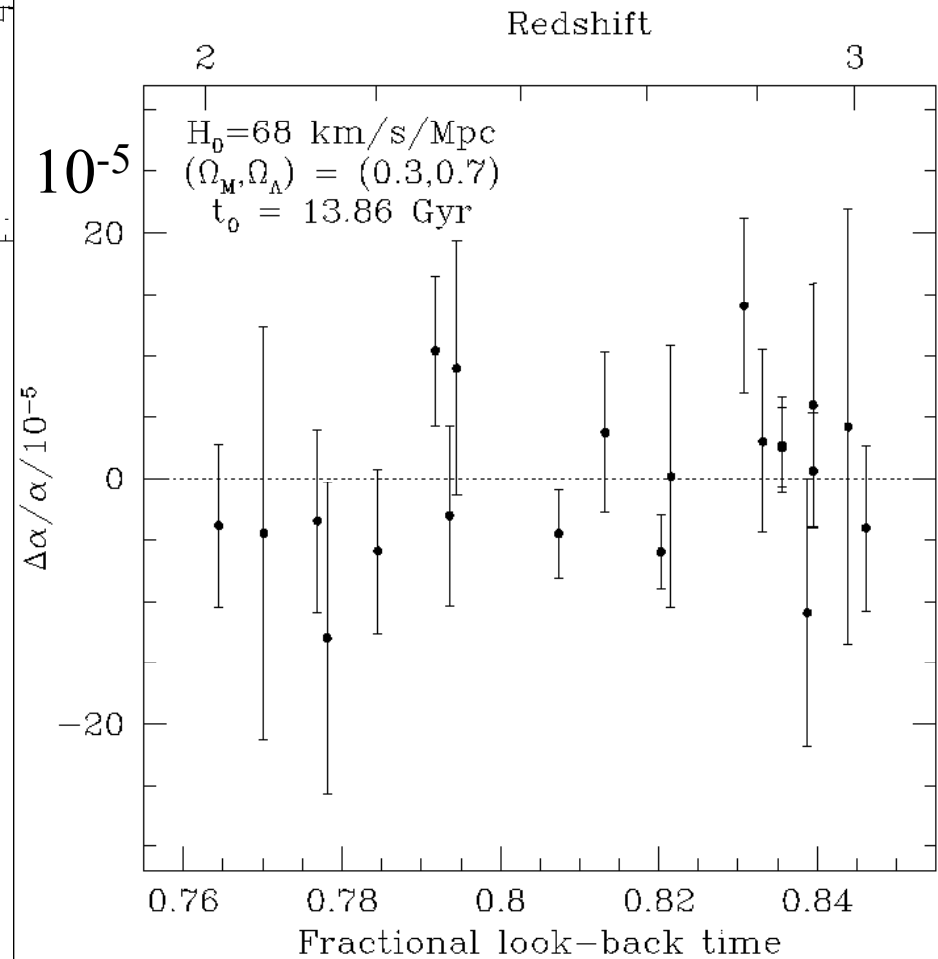
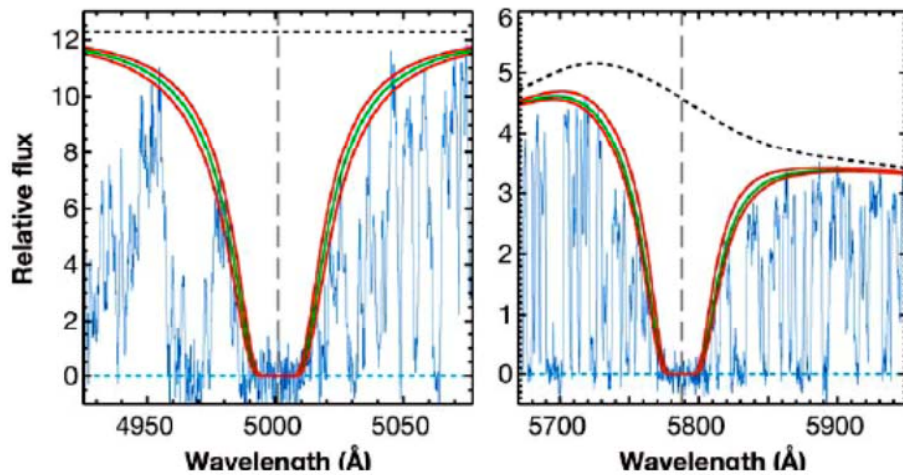
8 QSO et lignes de visée

Murphy et al 2001

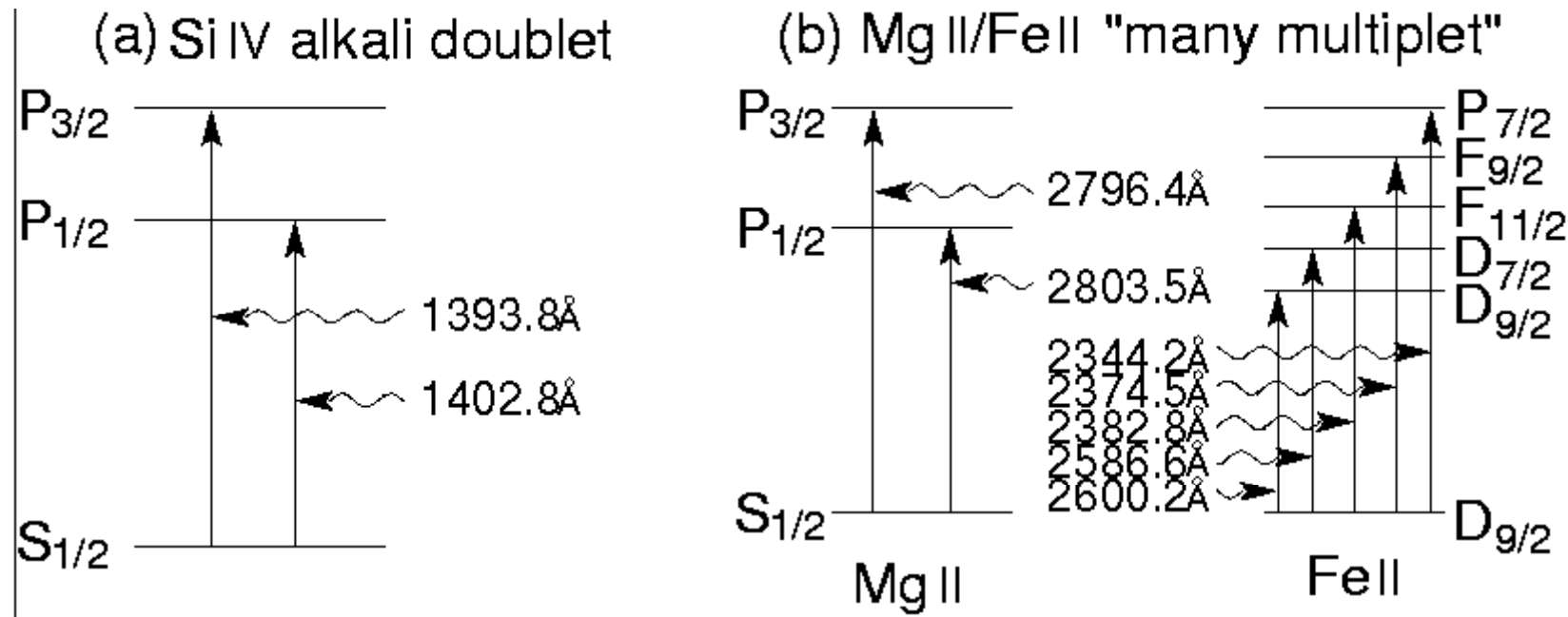


21 systèmes

Fits des profils de Voigt



Les deux méthodes principales



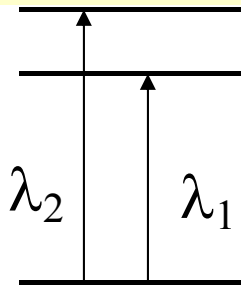
$$\omega_z = \omega_0 + q [(\alpha_z/\alpha_0)^2 - 1]$$

La méthode "alkali doublet"

Les raies de résonance en absorption comme CIV, SiIV, MgII sont observées couramment à grand redshift dans des nuages sur la ligne de visée. Bethe & Salpeter 1977 montrent que λ_1, λ_2 du doublet alkali-like, i.e transitions du type

$$\begin{aligned} \lambda_1 &: {}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2P_{3/2} \\ \lambda_2 &: {}^2S_{1/2} \rightarrow {}^2P_{1/2} \end{aligned} \quad \text{sont reliées à } \alpha \text{ par}$$

$$\frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\lambda} \equiv \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \propto \alpha^2 \quad \text{qui implique} \quad \frac{\delta\alpha}{\alpha} = \frac{\delta(\Delta\lambda)}{2\Delta\lambda}$$



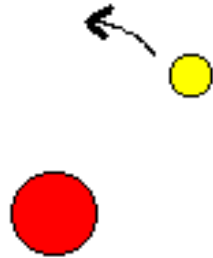
Note: λ_1 et λ_2 mesurées relativement au *même* état fondamental

La méthode MM "Many-Multiplet"

Différents multiplets simultanément, pour gagner un ordre de grandeur

En plus des doublets alcalins

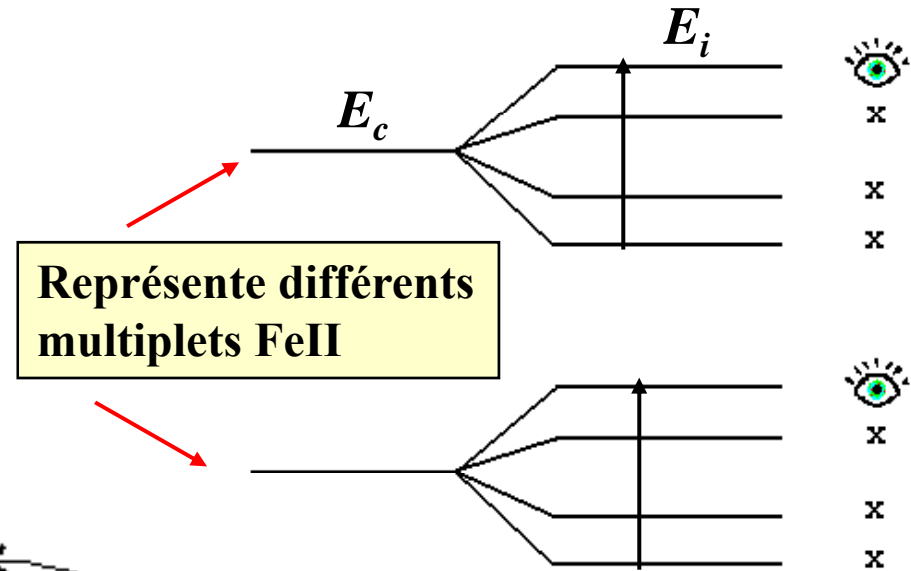
beaucoup d'autres raies existent dans les spectres des quasars. Les longueurs d'ondes sont mesurées par rapport à *différents* niveaux



Noyau de faible masse
L'électron dans un potentiel faible bouge lentement: **petite** correction relativiste



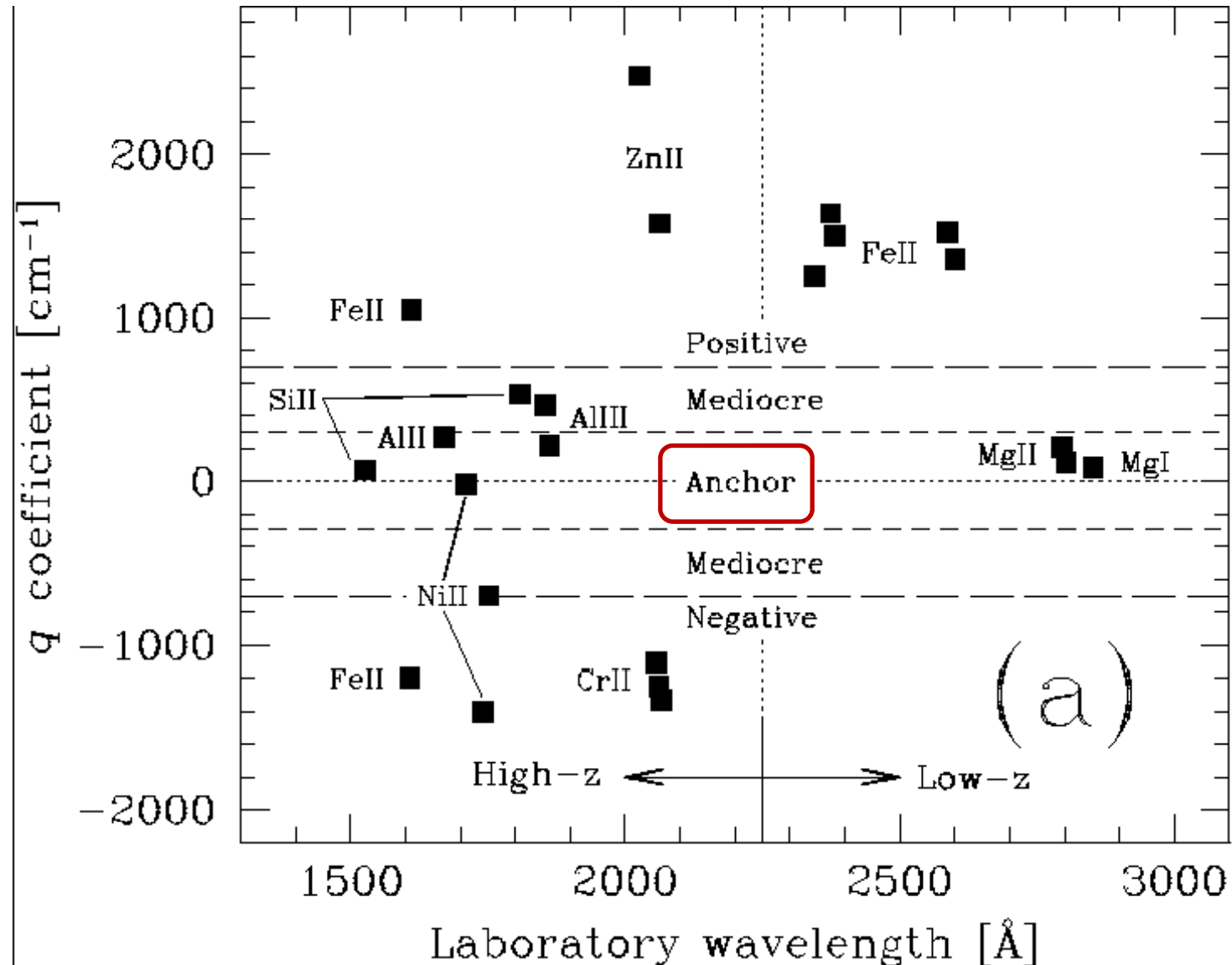
Noyau de forte masse
L'électron dans un potentiel profond bouge plus vite: **grande** correction relativiste

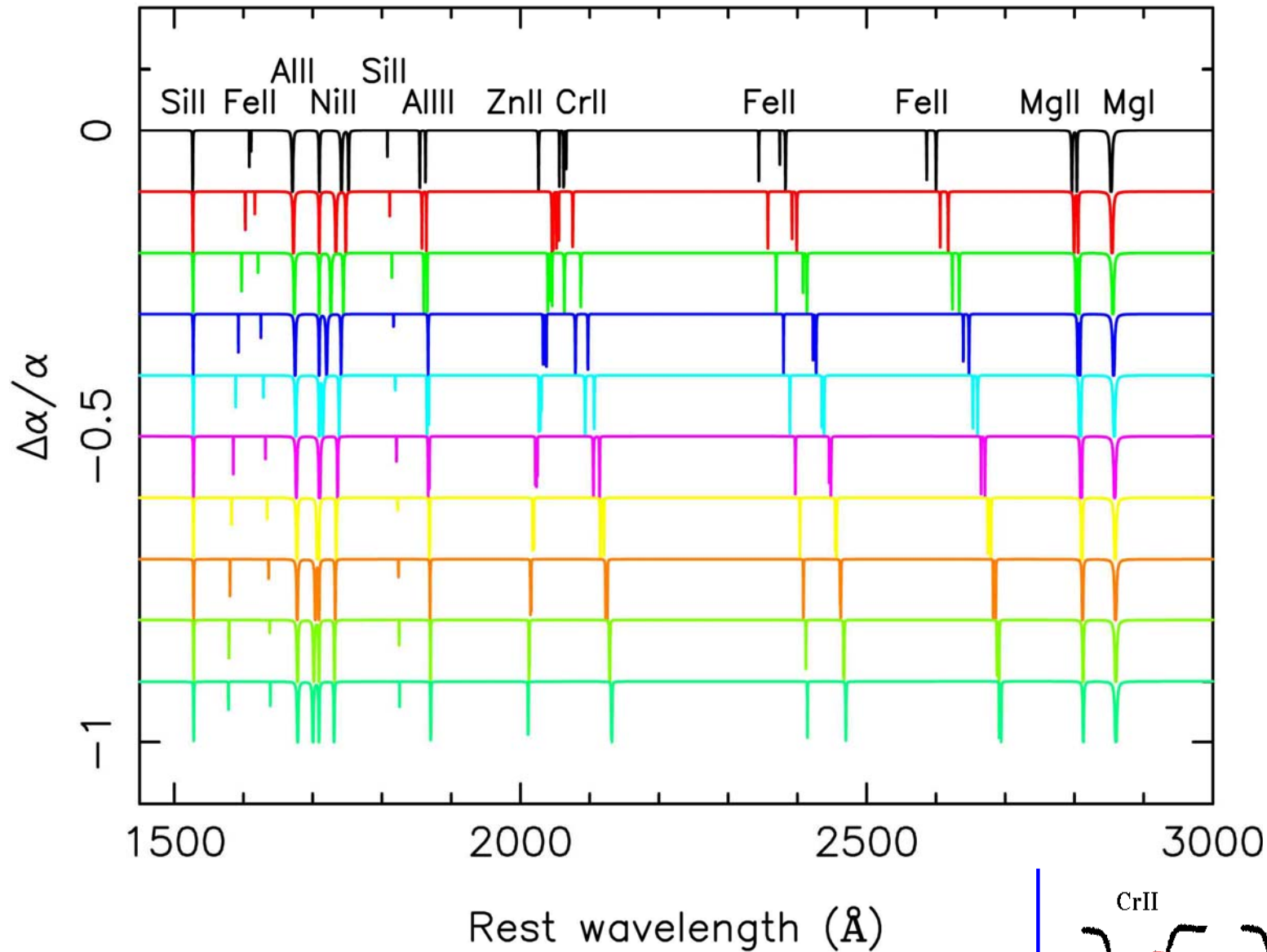


Sensibilité des diverses raies

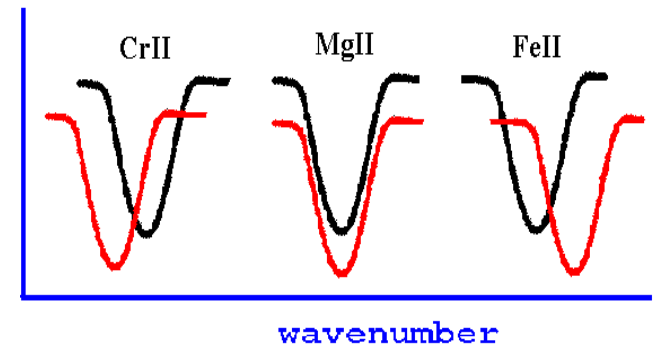
$$\omega_z = \omega_0 + q [(\alpha_z/\alpha_0)^2 - 1]$$

*Murphy
et al 2002*





MgII joue le rôle d'ancre



Déplacement des raies en fonction de $\Delta\alpha/\alpha$
 Dans un sens ou dans un autre, plus ou moins

Résultats des doublets ou méthode MM

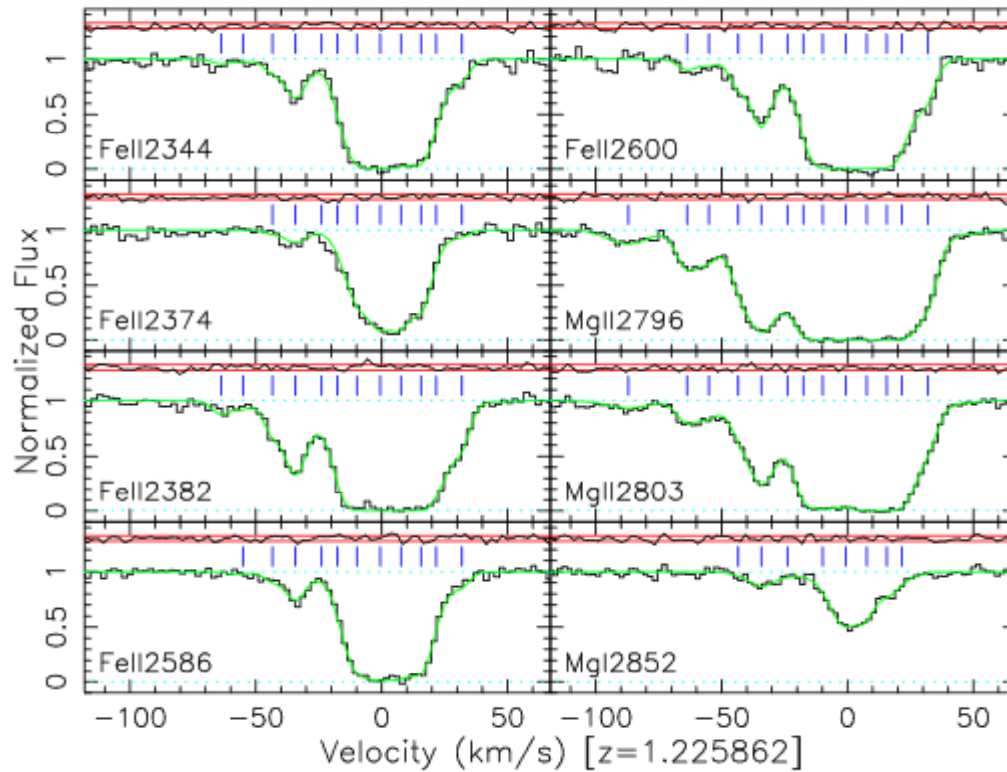
Murphy et al (2001), Webb et al (2001)

Nombreux multiplets MgI, MgII, Al II, Al III, SiII, CrII, FeII, NiII, Zn II

Avantages MM versus AD:

- ♥ Inclure toutes les corrections relativistes (y compris état fondamental)
- ♥ Plus de statistiques, plus de raies devant chaque QSO
- ♥ Vitesses déterminées plus précisément, car obtenues avec plus d'espèces
- ♥ Comparaison entre espèces de coefficient q différents

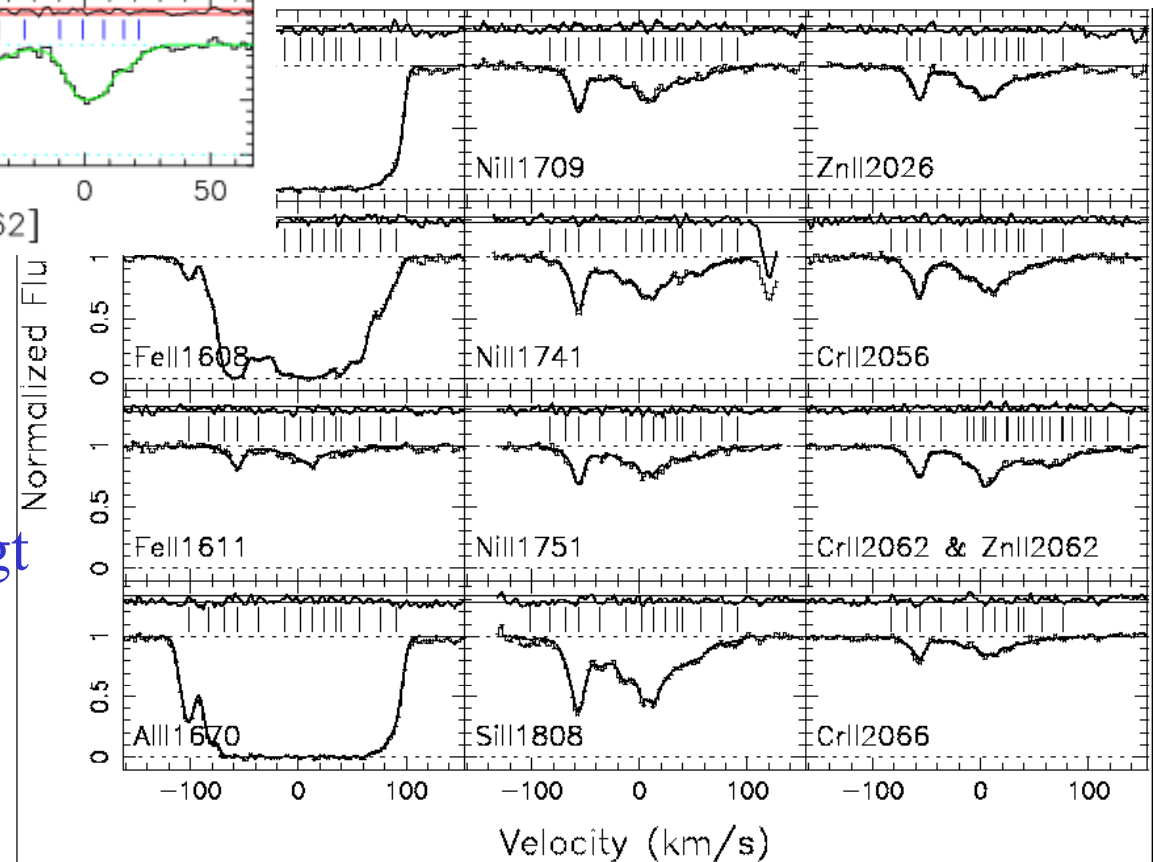
Q1437+3007, $z_{em}=3.00$, $z_{obs}=1.2259$



Raies de Mg et Fe
vers Q1437+3007 $z=1.226$

Raies éléments lourds vers
Q2206-199, $z=1.920$
Fit avec des profils de Voigt
Erreurs à 1σ

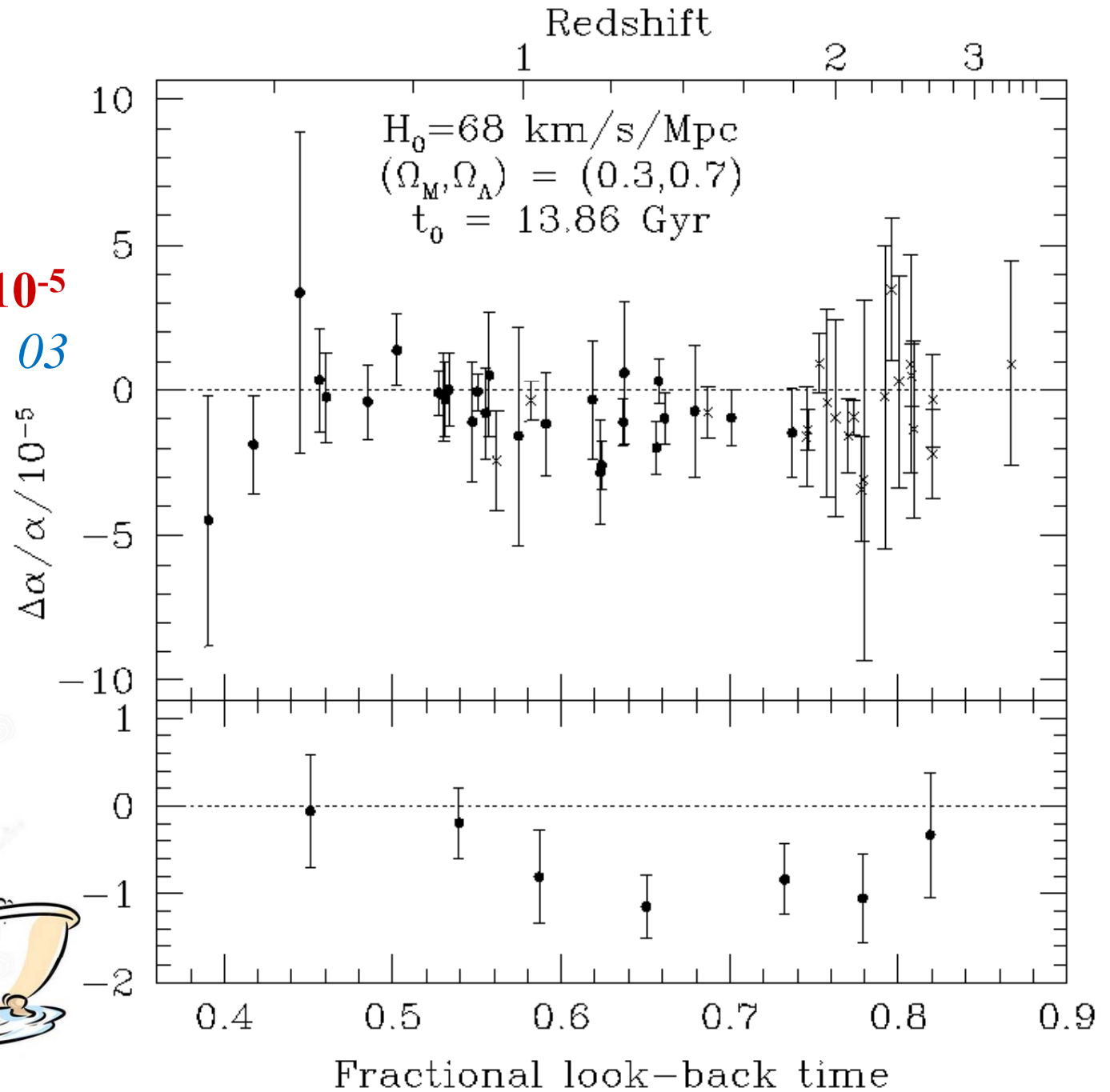
Murphy et al 2001, 2003



**Une variation
se profile!**

$$\Delta\alpha/\alpha = (-0.57 \pm 0.1) 10^{-5}$$

Murphy et al 2001, 03



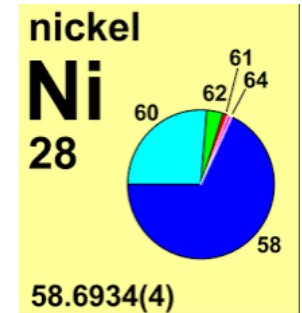
Effets systématiques possibles MM method

$\Delta\alpha/\alpha$ négatif? $\omega(z) = \omega(0) + q_1 x + q_2 y$

$x = \alpha(z)/\alpha(0)^2 - 1$ $y = \alpha(z)/\alpha(0)^4 - 1$

FeII effets bien plus grands que sur MgII

Certains ions ont $q_1 > 0$, d'autres $q_1 < 0$



Fréquences au laboratoire

Les incertitudes sont inférieures $\Delta\alpha/\alpha \sim 10^{-6}$

Les erreurs sur toutes les espèces différentes devraient s'annuler

Saturation isotopique différentielle

Tous les ions ont des isotopes (sauf Al)

Les fréquences labo sont des composites, moyennant tous les isotopes

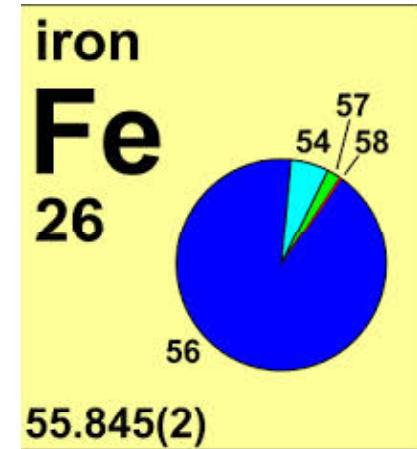
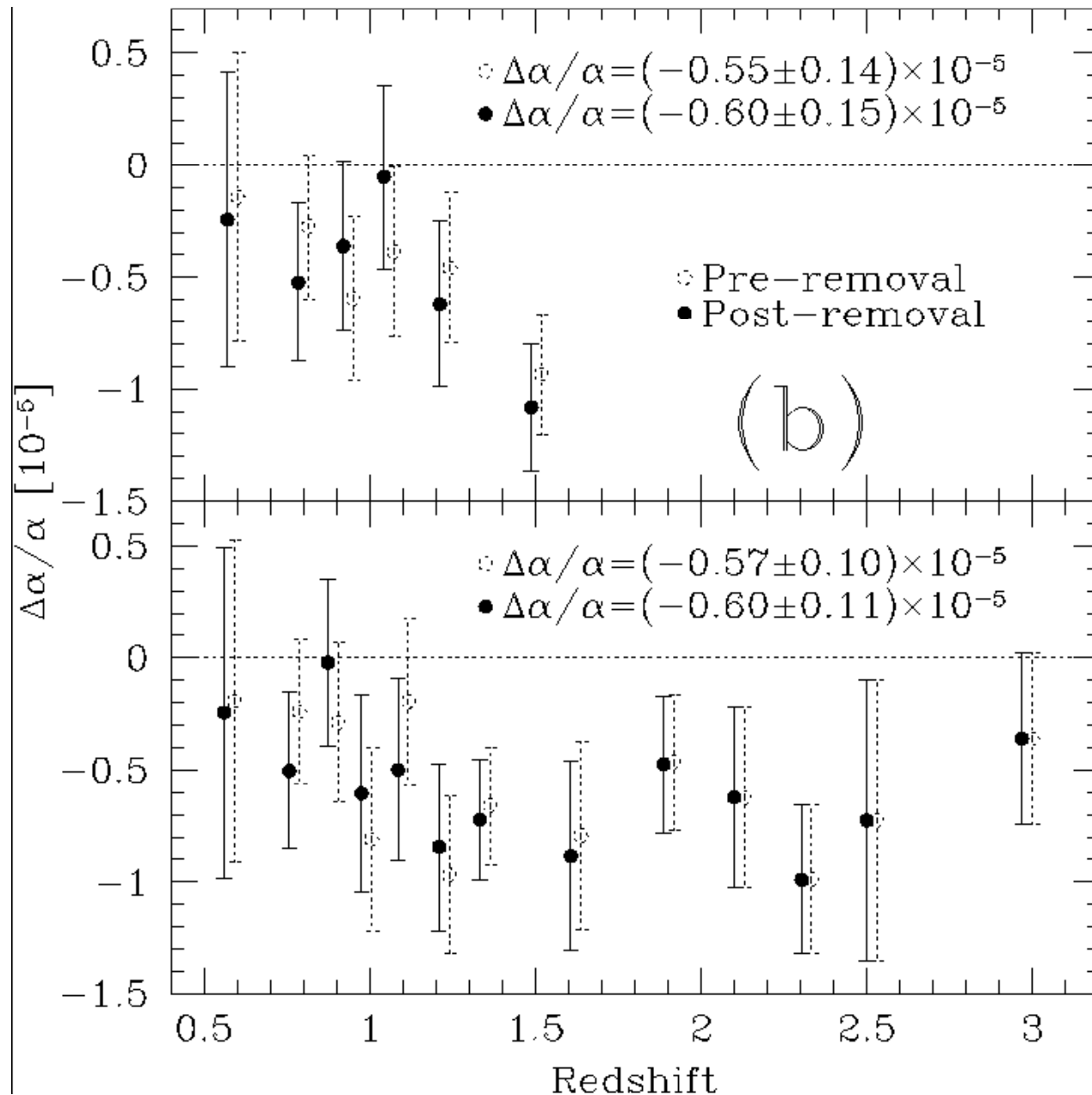
Problème lors de la saturation de l'isotope principal

Le centroïde se déplace Le déplacement isotopique est en $\omega(0)/m^2$

Effets surtout pour les 4 atomes plus lourds Cr, Fe, Ni, Zn

Seulement quelques raies de Fe semblent saturées

Après soustraction des isotopes faibles



L'effet peut être estimé, en supposant toutes les raies saturées et le centroïde moyen avec rapports d'abondance de 1
 $\Delta\alpha/\alpha \sim 10^{-5}$ Donc l'effet observé sur Fe ne peut pas venir de là

Variation de l'abondance isotopique

Les abondances pourraient varier avec z Et ne pas être = terrestres

Les plus importantes Mg, Si (atomes légers)

Dans les QSO, pour $\text{Fe}/\text{H} = 1$, $^{25}\text{Mg}/^{24}\text{Mg}$ 20% en dessous de la valeur terrestre

$\Delta\alpha/\alpha \sim 0.6 \cdot 10^{-5}$ attendus; les corrections rendraient $\Delta\alpha/\alpha$ plus négatifs

Effets de structure hyperfine

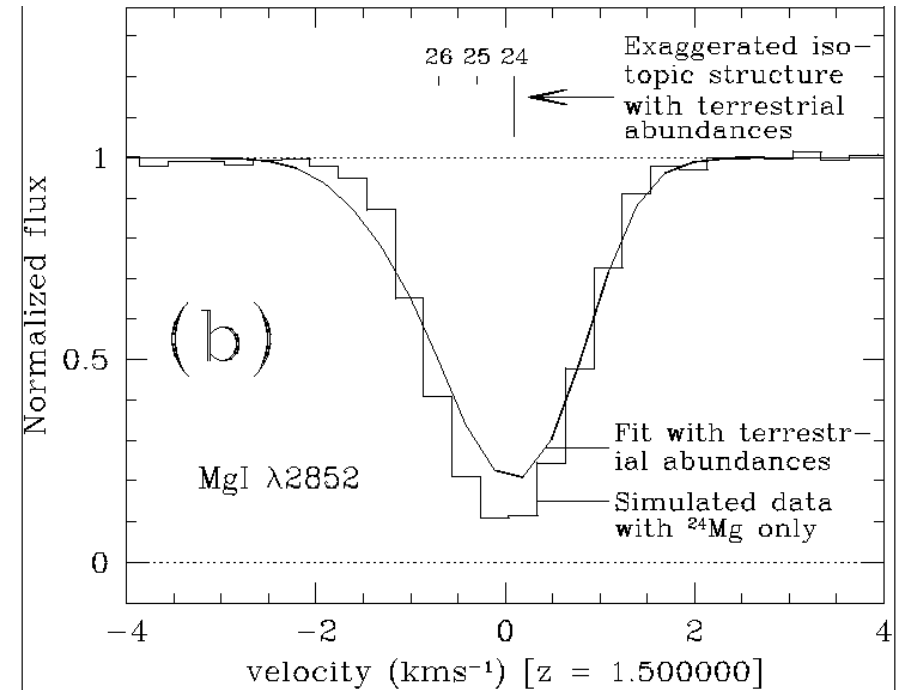
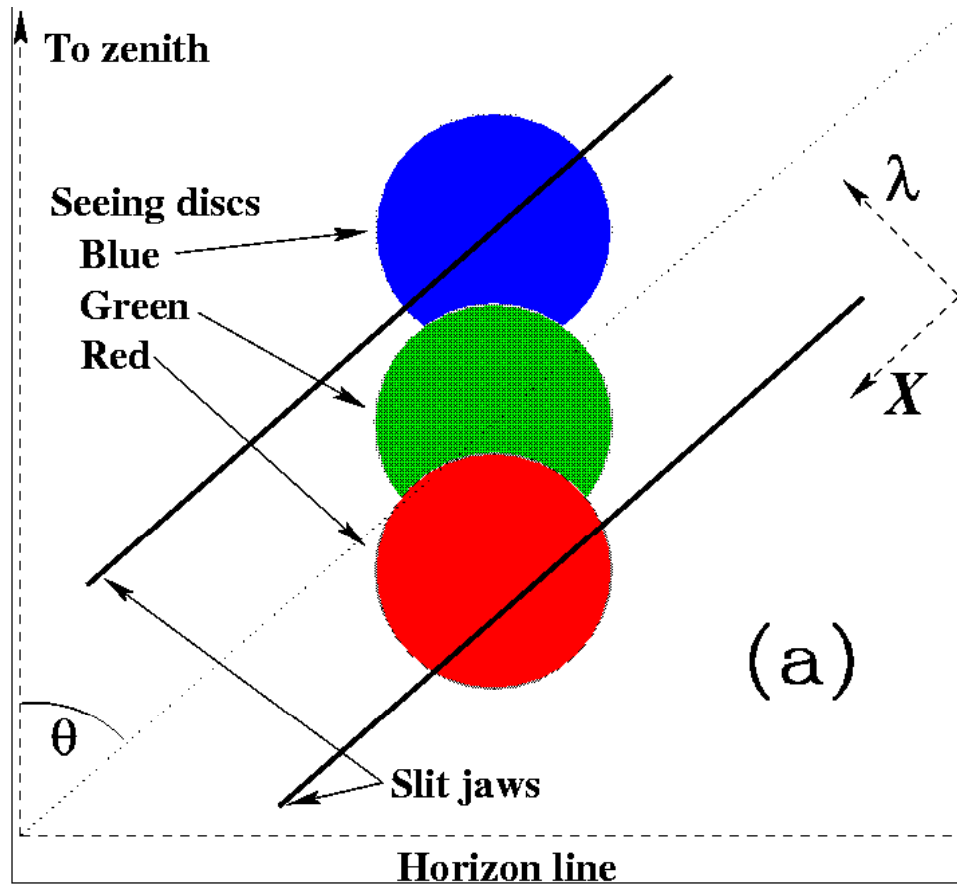
Le pire des cas est ^{27}Al : structure hyperfine résolue

Il pourrait y avoir des effets de **saturation différentielle**

Mais n'affecte pas en général tous les autres éléments

Pour AlIII, déplacement de $0,01\text{cm}^{-1}$

Dispersion atmosphérique et isotopes

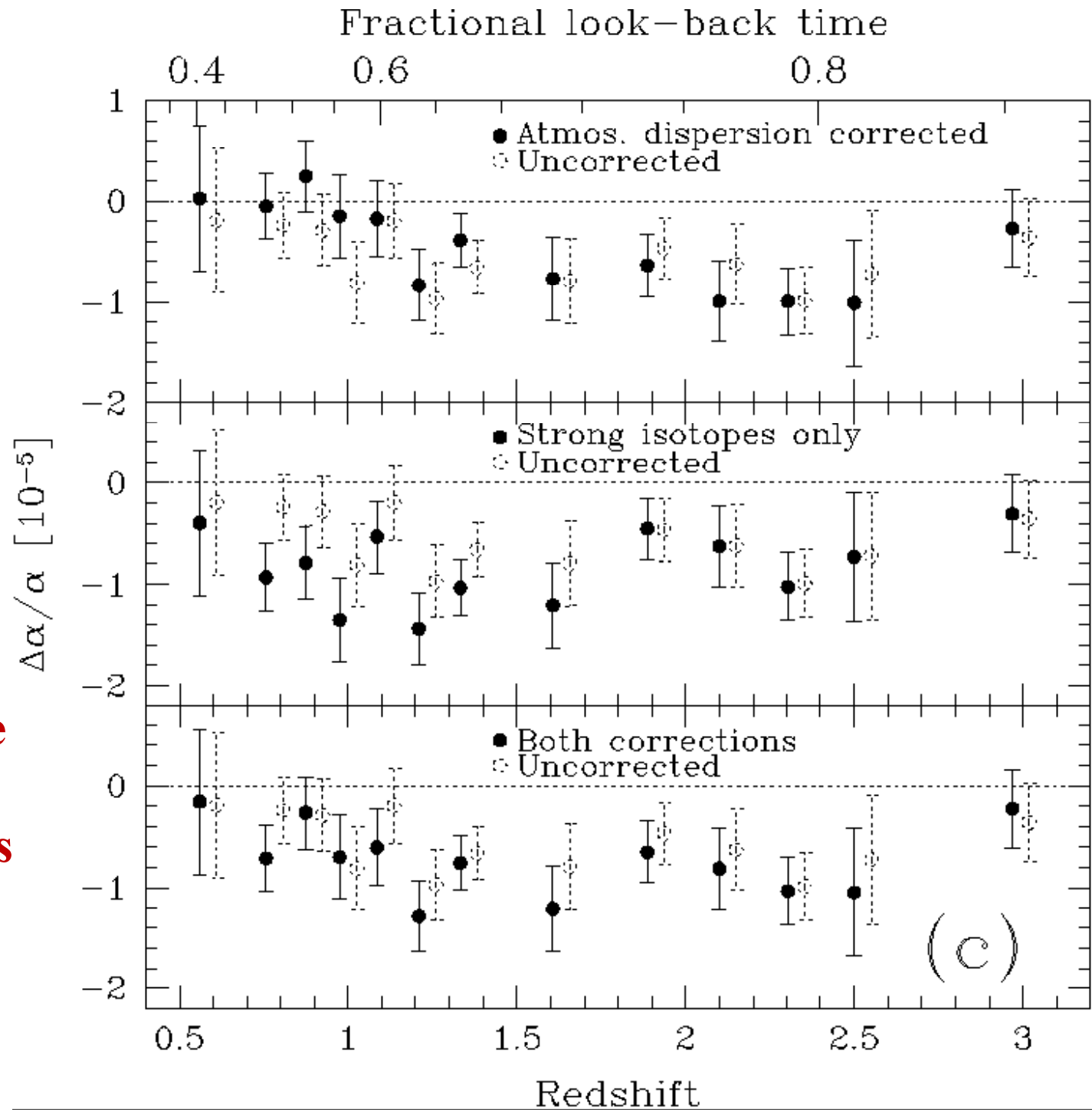


Si la fente n'est pas parallèle à l'horizon, la dispersion comprime le spectre, et le tronque aux bords

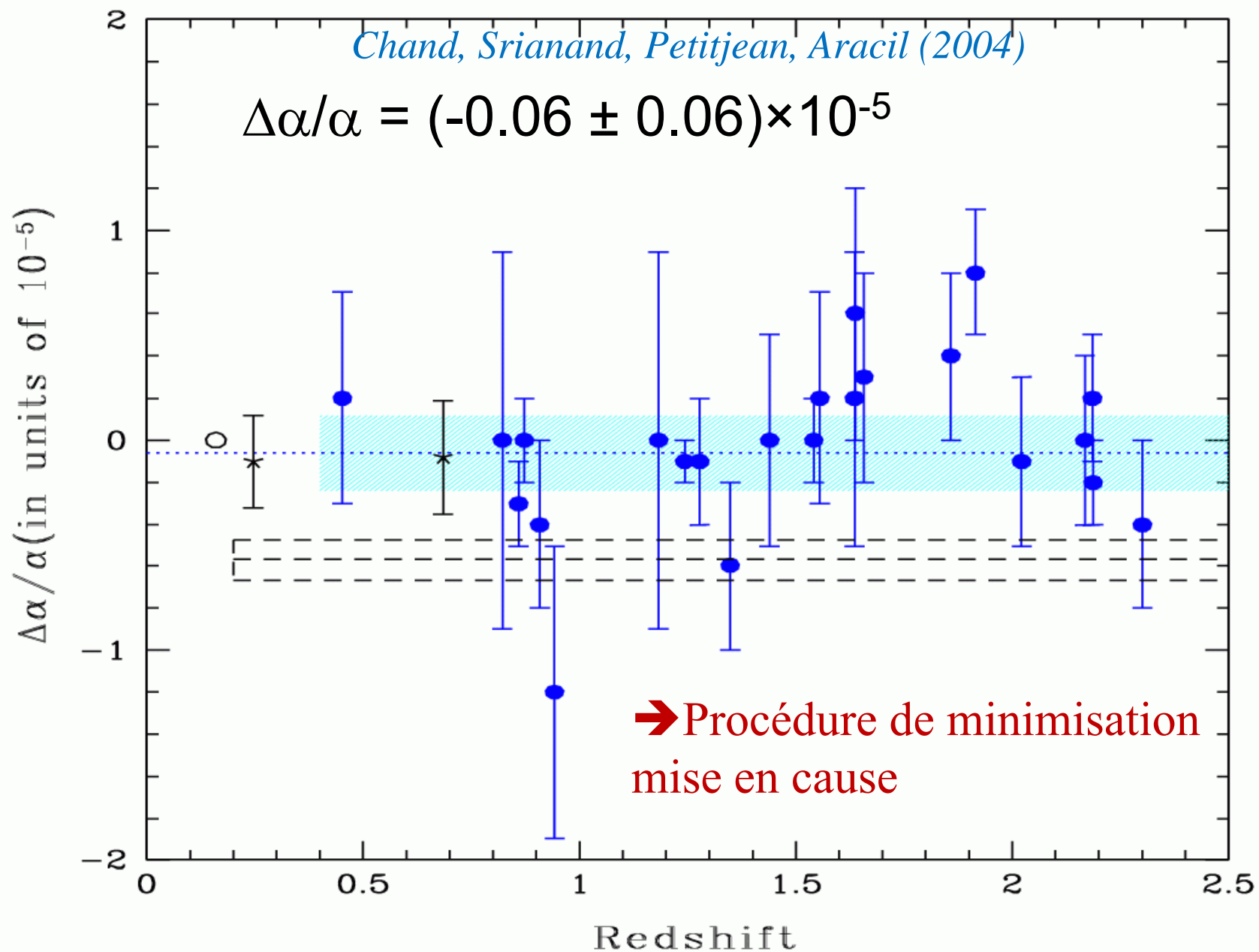
+ Effets de rapports isotopiques différents

Murphy et al
2002

**$\Delta\alpha/\alpha$ subsiste
après toutes
les corrections**



Résultats contradictoires



Absorption en radio-astronomie

Variations de $y = \alpha^2 g_p m_e / m_p$

HI 21cm rapport hyperfin $\sim \mu_p \mu_B / h a^3$

$\mu_p = g_p e \hbar / 4m_p c$ $\mu_B = e \hbar / 2mc$

Raies de rotation CO $\sim h / (M a^2)$

M masse réduite

En fait variations de $\alpha^2 g_p$

(les variations de M/m_p sont supprimées
par un factor $m_p/U \sim 100$)

Quasars PKS1413+135, raies très fines

B0218+357 PKS1830 lentilles gravit

B 1504+377: plusieurs V?

Avantages: tech. hétérodynes R de 10^6

+Raies plus fines, car gaz froid

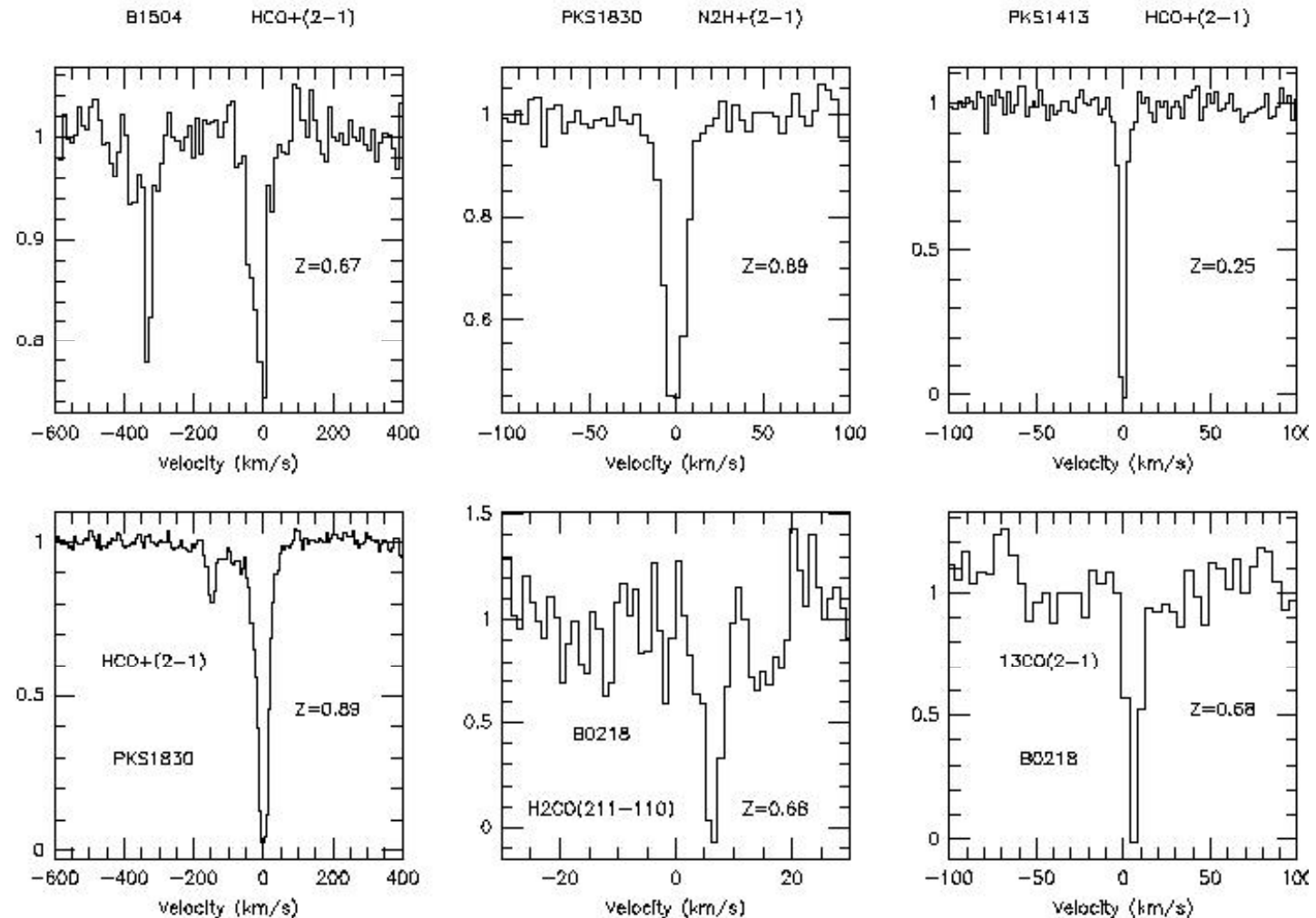
$a = \text{rayon de Bohr} = \hbar^2 / m e^2$



IRAM-30m

R $\sim 10^6$

En absorption, les masses détectées peuvent être **seulement de 1 Mo**
 Grande variété de largeurs de raies, épaisseurs optiques, parfois
 plusieurs raies sont détectées le long de la même ligne de visée



Wiklind & Combes 1998

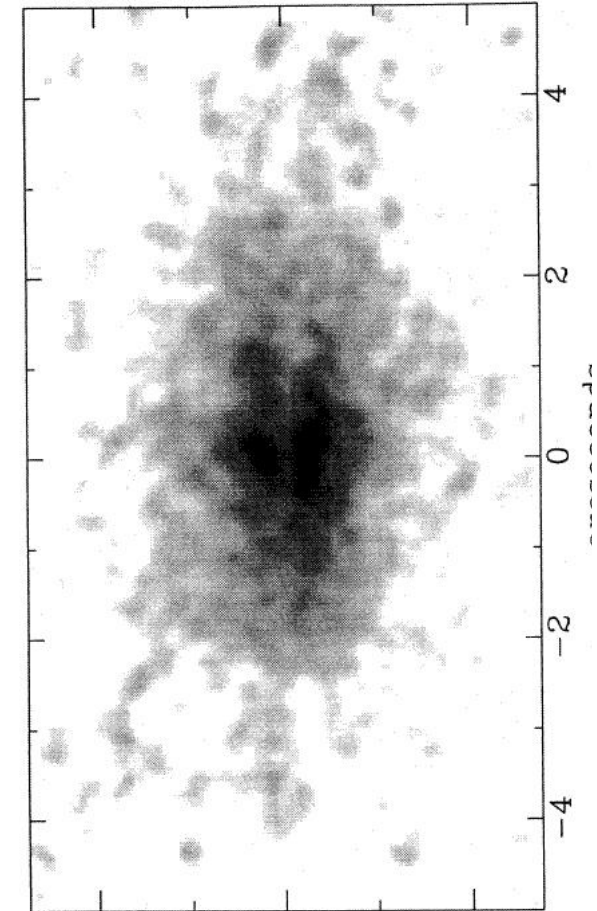
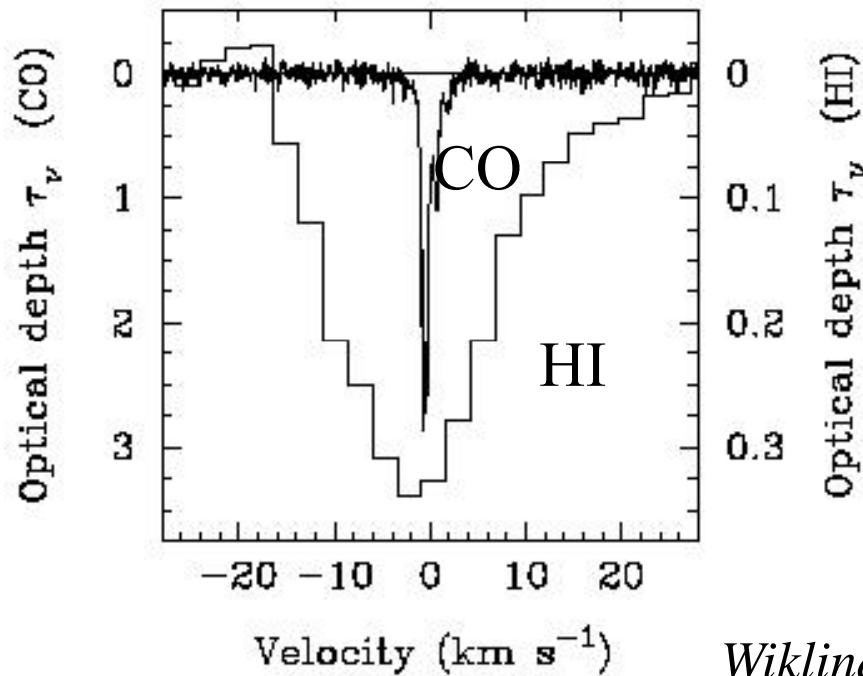
PKS1413+135 $z=0.247$

Absorption très étroite $< 1\text{km/s}$ (2 comp)

BLac, très variable, aussi en radio

HI optiquement mince, $N(\text{H}2) > 10^{22} \text{ cm}^{-2}$,

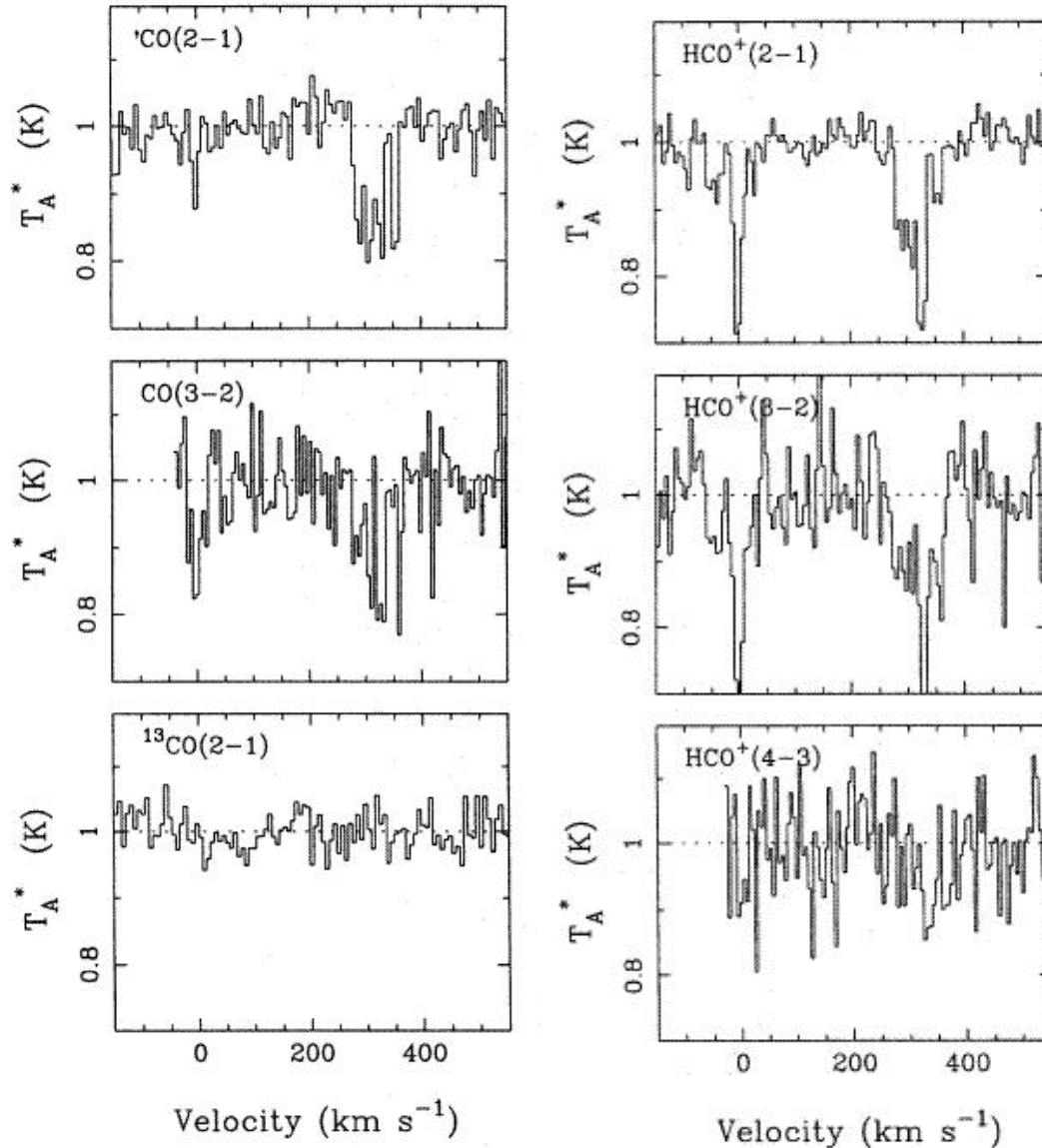
$A_v > 30 \text{ mag}$



McHardy et al 94 44

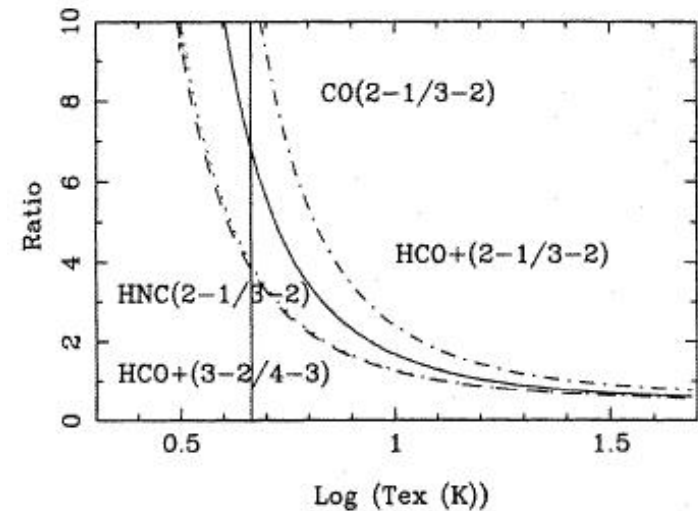
Wiklund & Combes (1997)

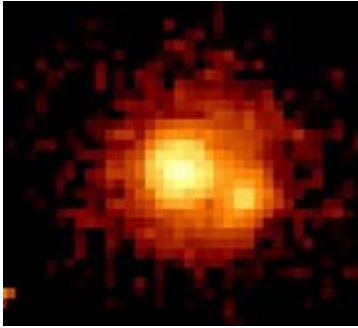
B3 1504+377 z=0.672



7 raies moléculaires différentes
Grande séparation **330km/s**
Anneau nucléaire + bras spiral
absorption de la source centrale
 $\text{HNC}/\text{HCN} \Rightarrow T_{\text{kin}} = T_{\text{ex}}$

HCO^+ plus fort de 10-100
Gas diffus + clumps

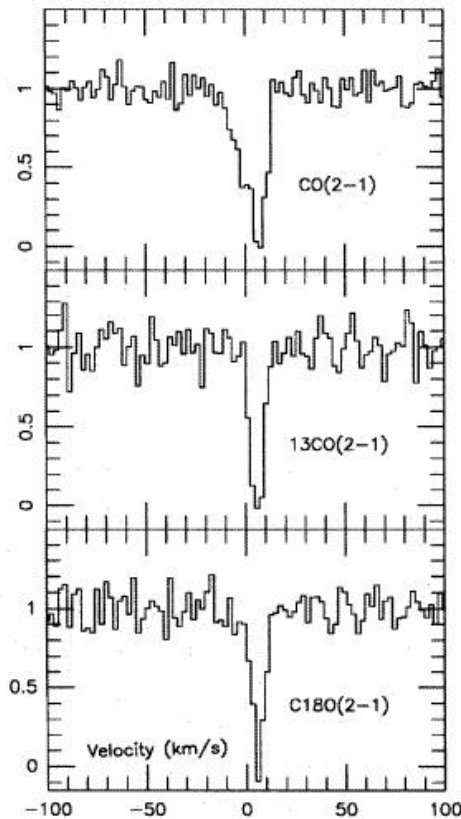
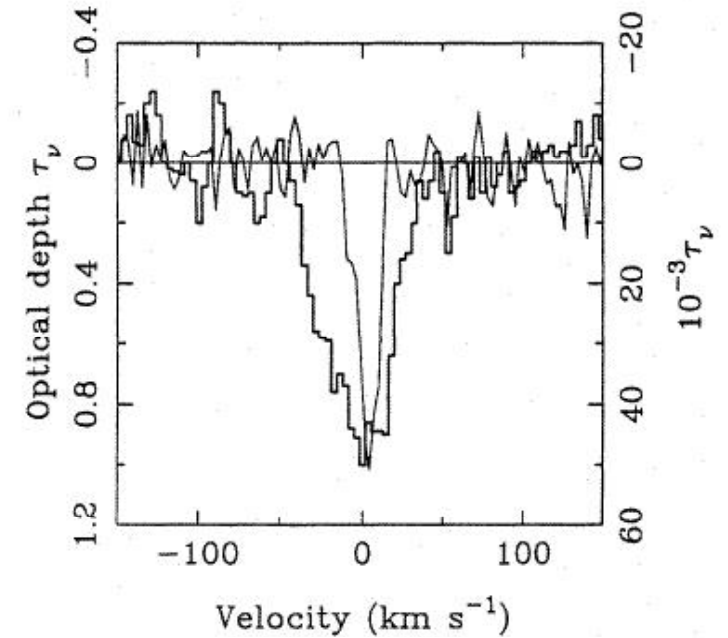




B0218+357 $z=0.685$

séparation 335mas (1.8kpc)

Lentille gravitationnelle (2 images A et B)
 La plus grande densité de colonne 10^{24}cm^{-2}

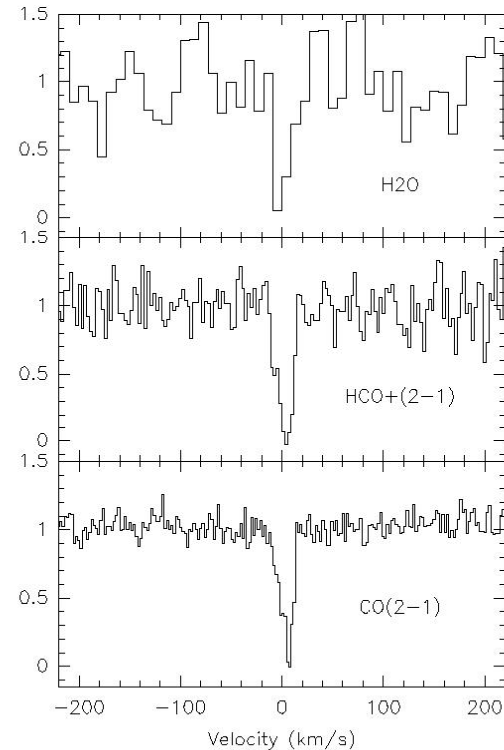


H_2O détecté à 557 GHz,
 $\tau = 40\,000$

H_2O abondant et froid
 $T=10\text{-}15\text{ K}$
 $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2=10^{-5}$

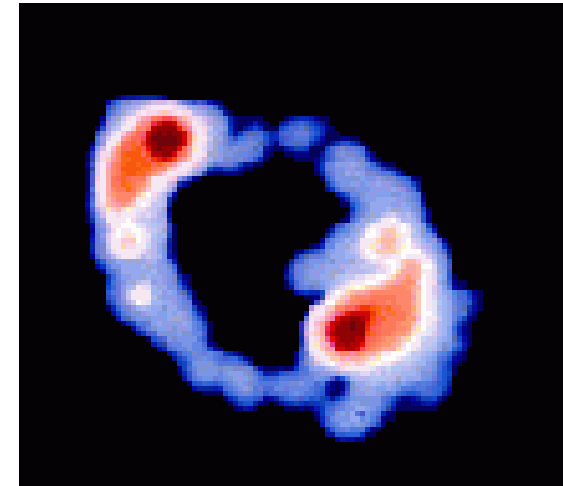
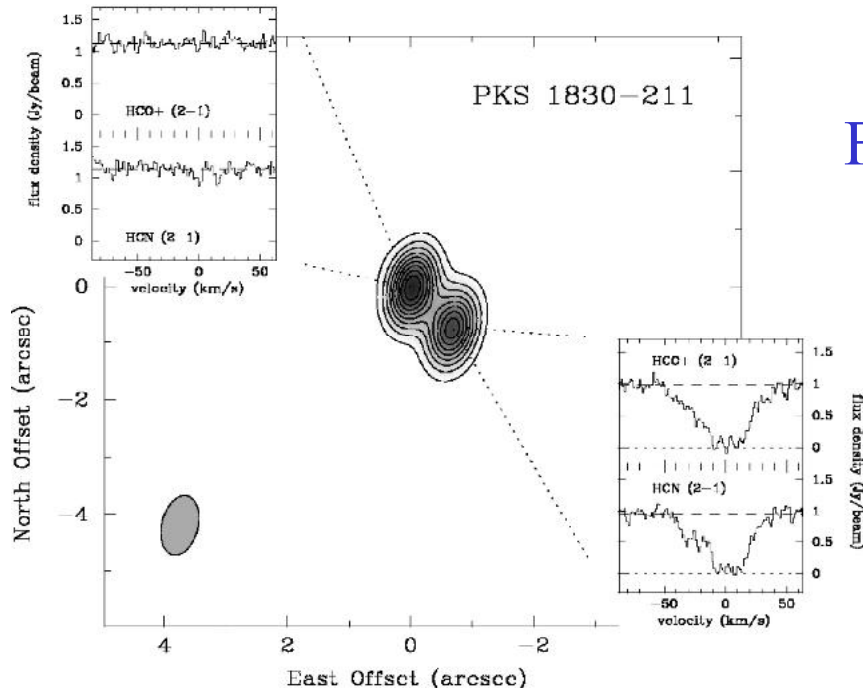
Les 3 isotopes de CO
 sont optiquement épais

Combes et al 1997



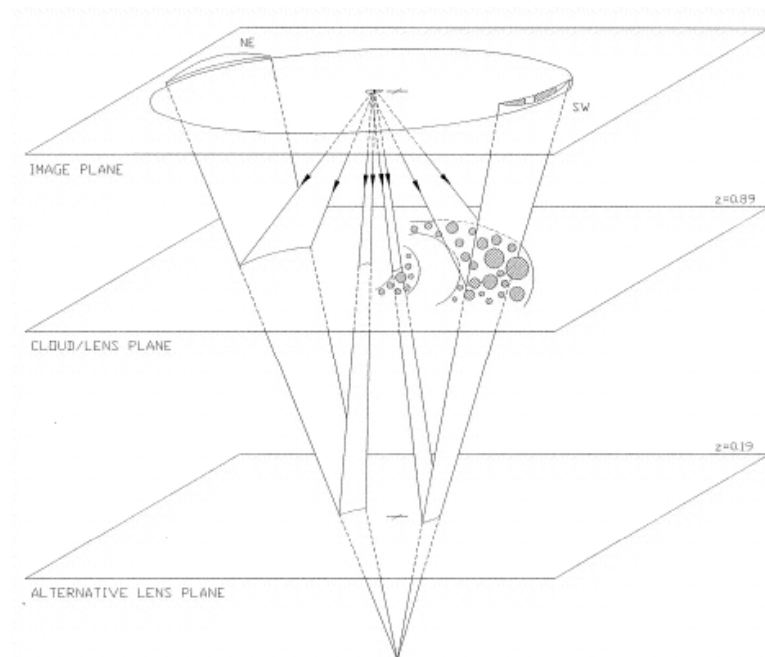
PKS1830-211 $z=0.88582$

Frye et al 97



2 images, + anneau d'Einstein

2 systèmes d'absorption
l'un à $z=0.19$ vu en HI
l'autre à $z=0.89$ en molécules



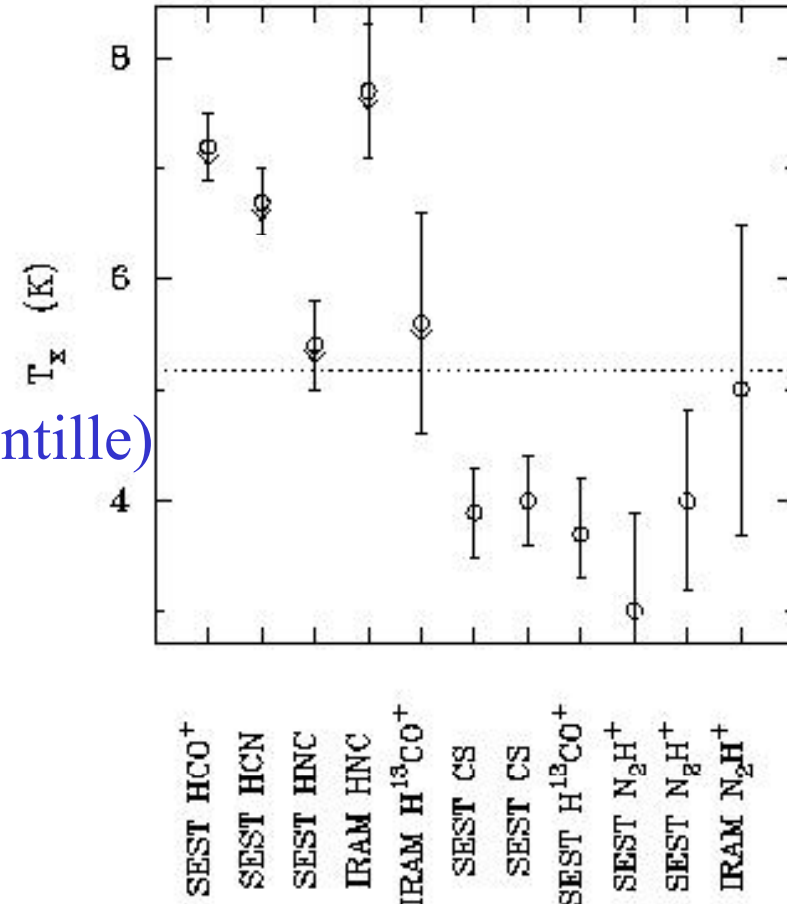
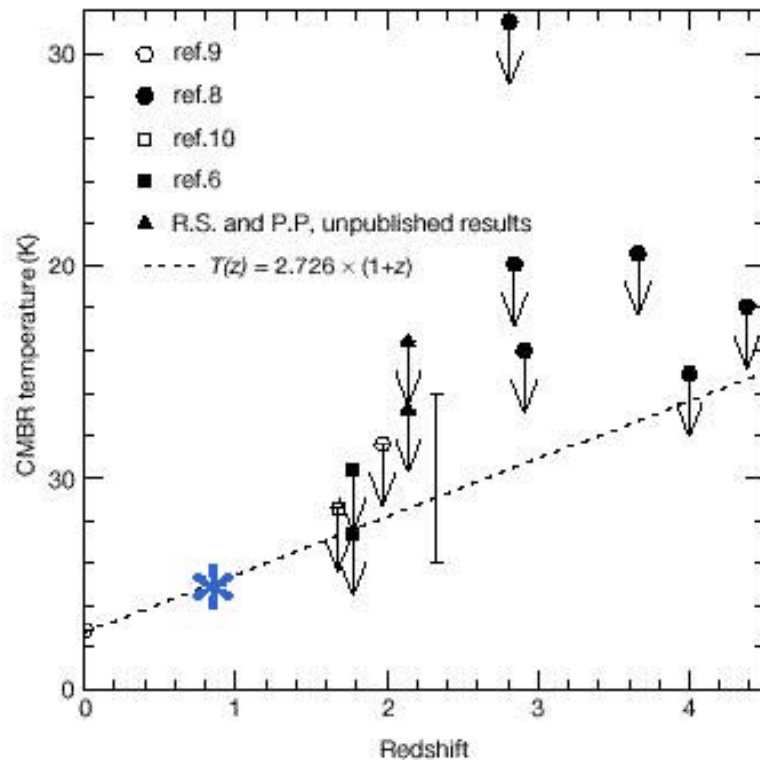
Mesure de $T_{mb}(z)$

Faible excitation (gas diffus)

$T_{ex} \sim T_{mb}$

Le cas de PKS1830-211

Plusieurs transitions donnent le même résultat (légèrement inférieur, microlentille)



A partir des raies UV de H_2
Srianand et al 2000

Variation de α

Dans le cas de PKS1413, il faut une résolution de 40m/s pour bien résoudre les raies!

Décomposition des spectres en plusieurs composantes, minimisant le χ^2

Résultats:

$$\Delta y/y = (-1.6 \pm 3.6) \cdot 10^{-6} \text{ pour B0218}$$

$$\Delta y/y = (-2.0 \pm 2.0) \cdot 10^{-6} \text{ pour PKS1413}$$

→ précision comparable à la méthode MM, sans détection

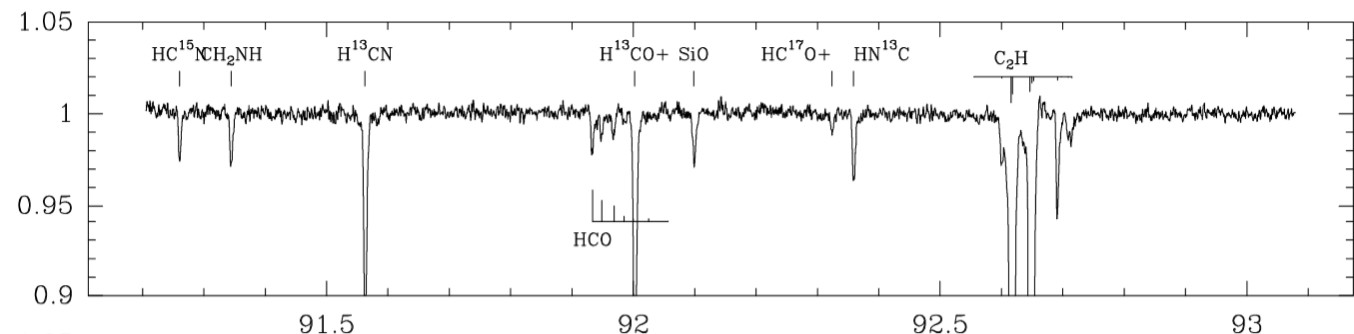


Absorption dans PKS1830-211 à $z=0.89$, Müller *et al* 2014, Beelen *et al* 2015

Avec CH et H₂O

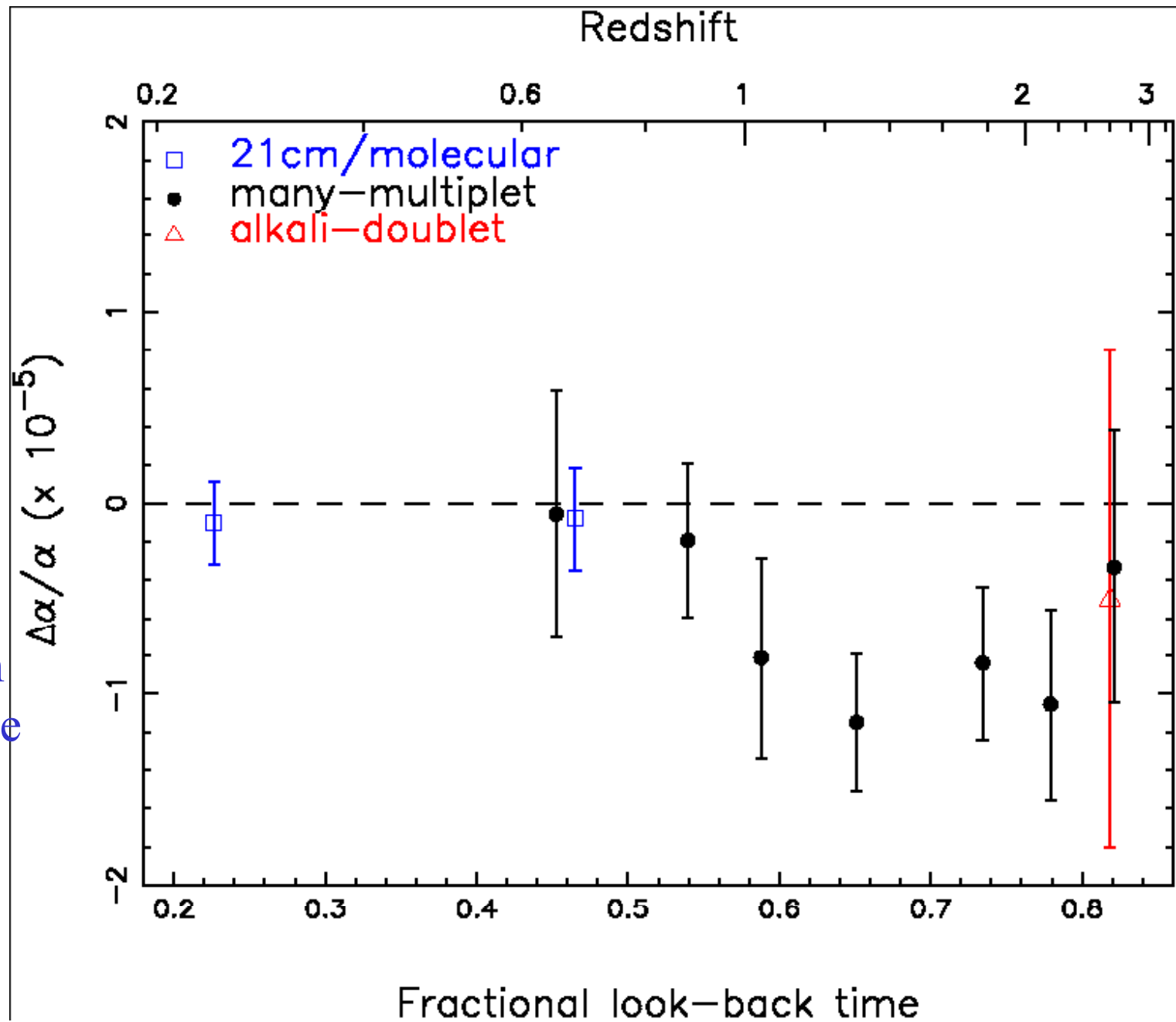
$$\rightarrow \Delta\alpha/\alpha < 5.8 \times 10^{-7}$$

$$\text{ou } \Delta\mu/\mu < 1.2 \times 10^{-6}$$



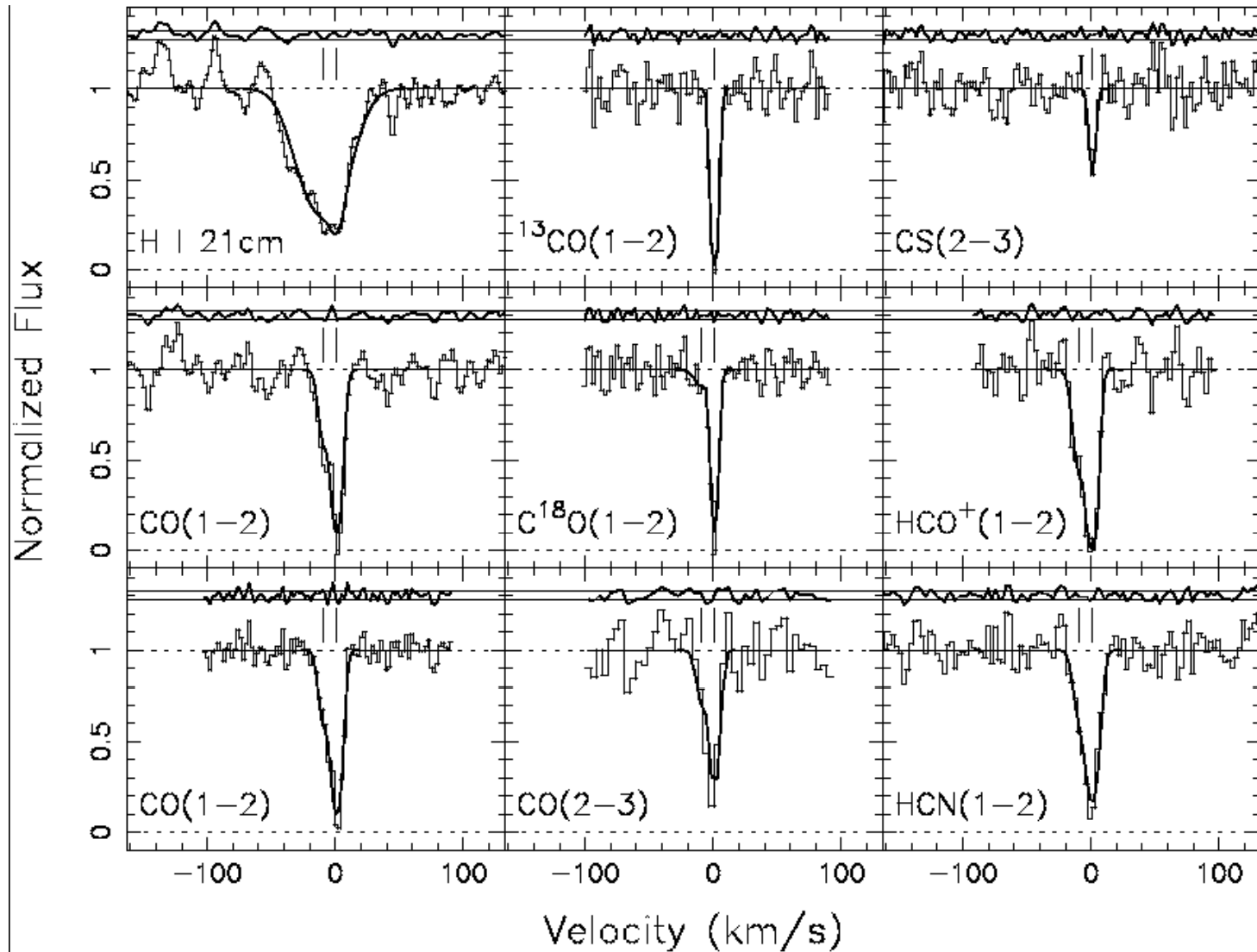
Webb et al 2001

Comparaison avec l'optique

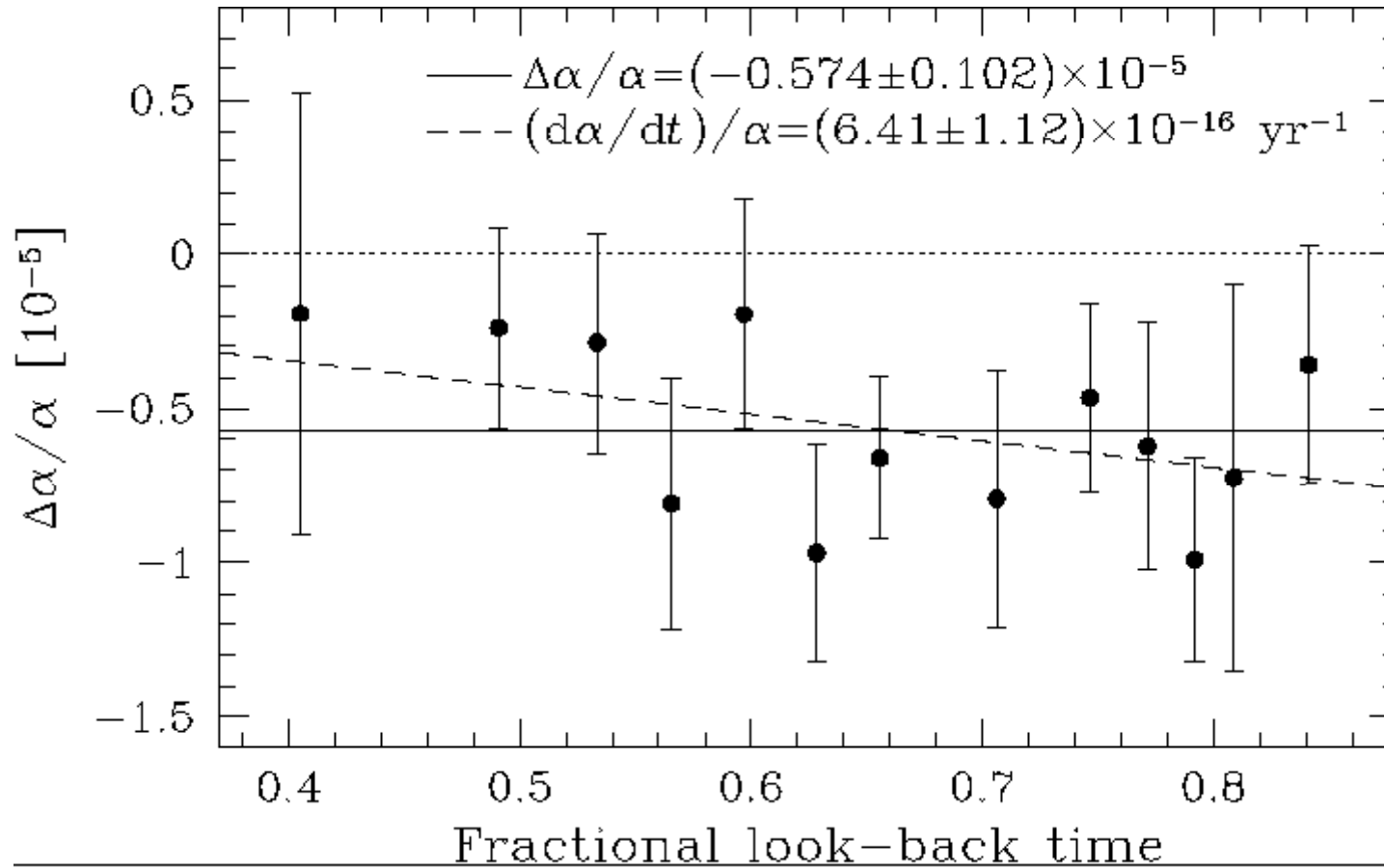


Radio HI-21cm et millimétrique (molécules)

Méthode de minimisation

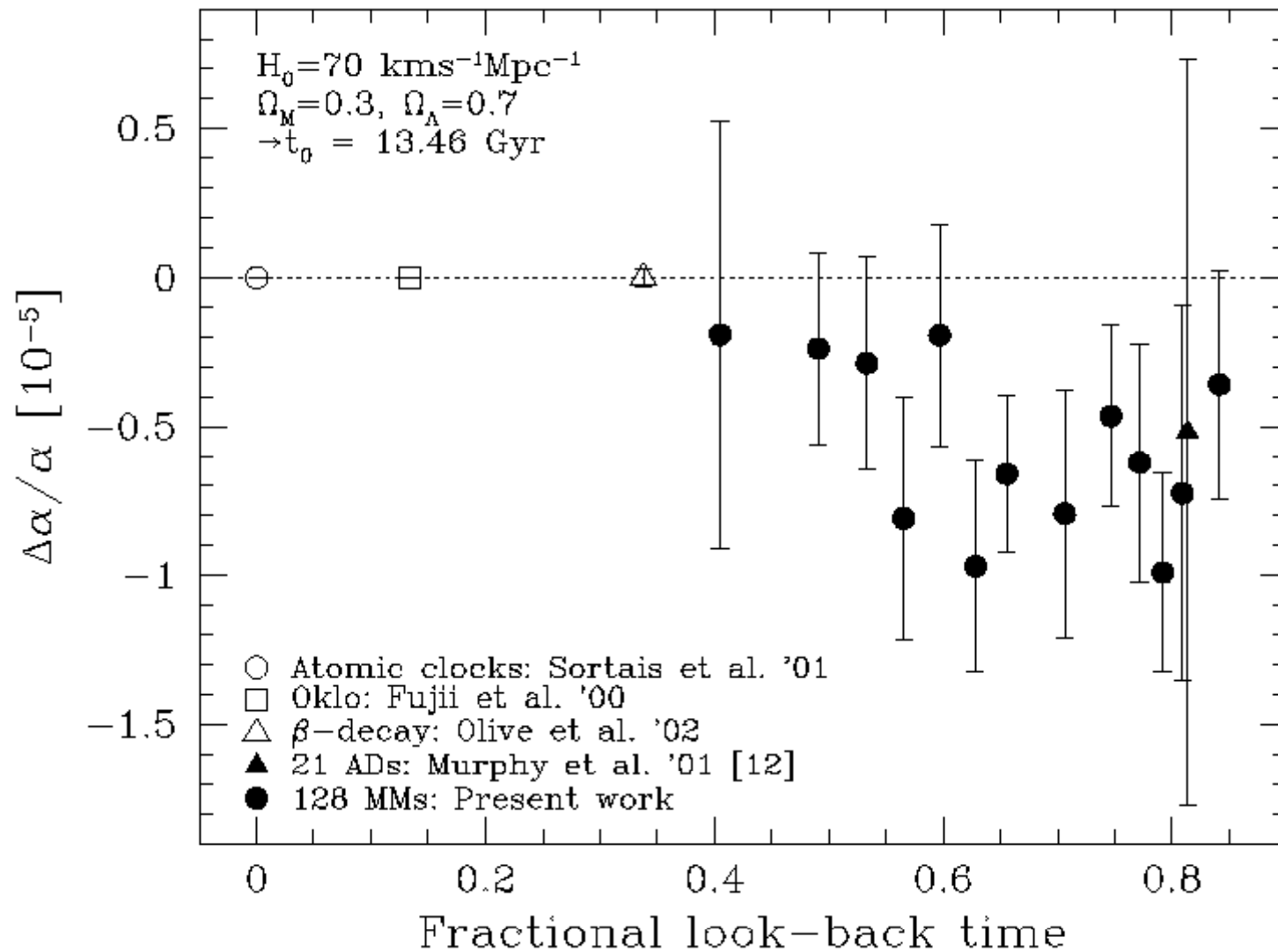


Résumé et interprétation



Droite pleine: la moyenne

Ligne pointillée: fit avec $\Delta\alpha/\alpha = 0$ fixé à $z=0$.



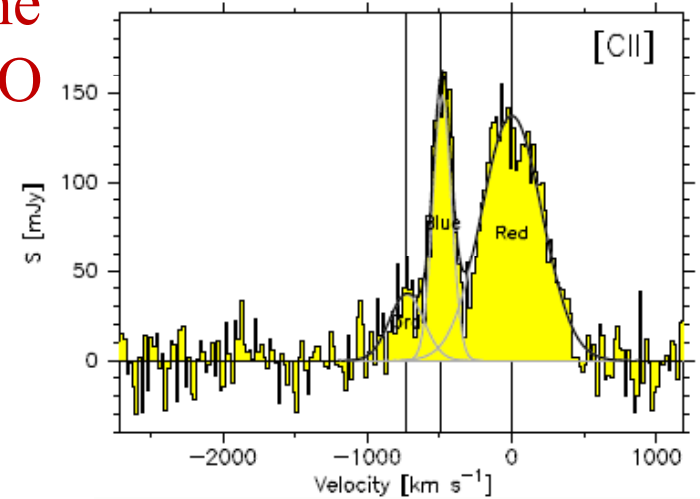
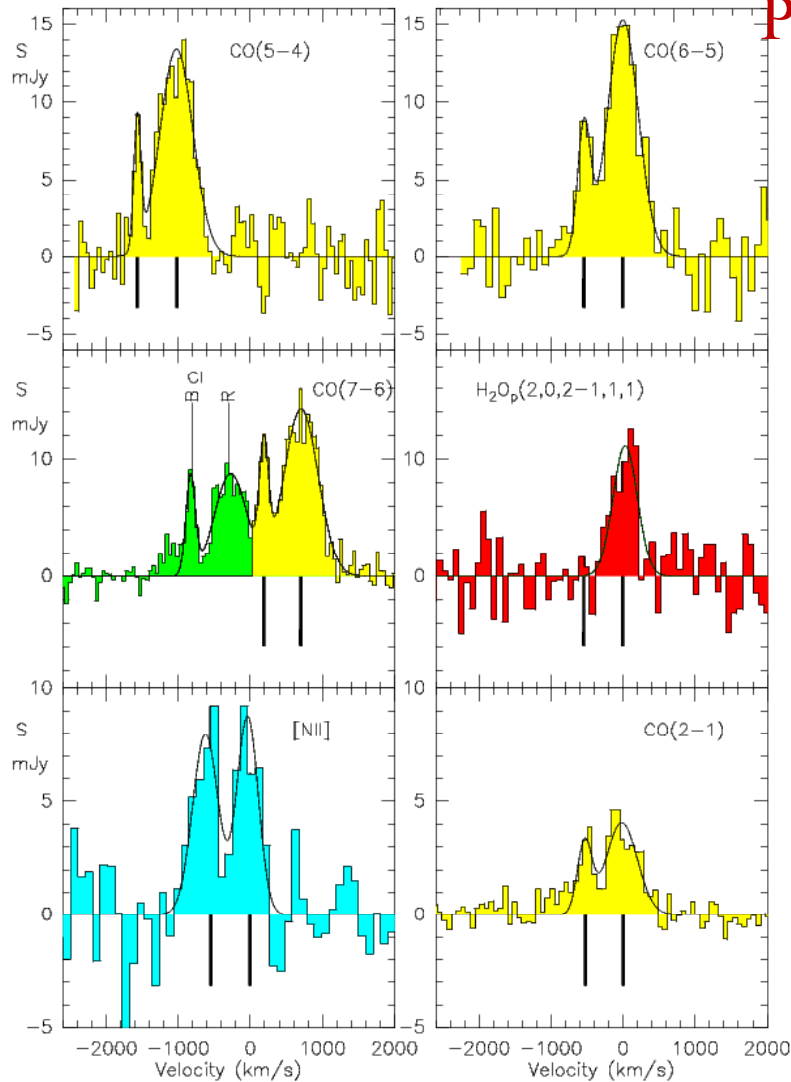
Mesures locales: symboles ouverts

Absorptions des quasars: **symboles pleins**

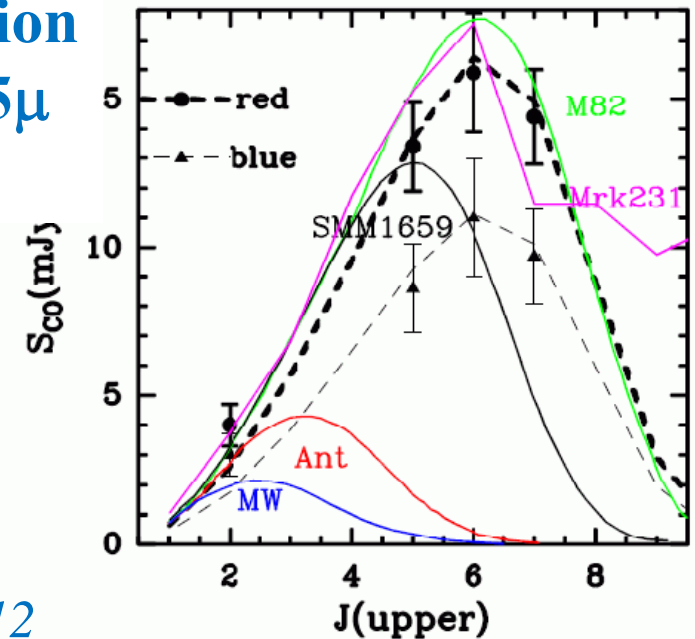
Olive et al (2002) météorites dans le système solaire

Plus grand z découvert à l'IRAM (z=5.243)

Redshift déterminé
Par les raies de CO

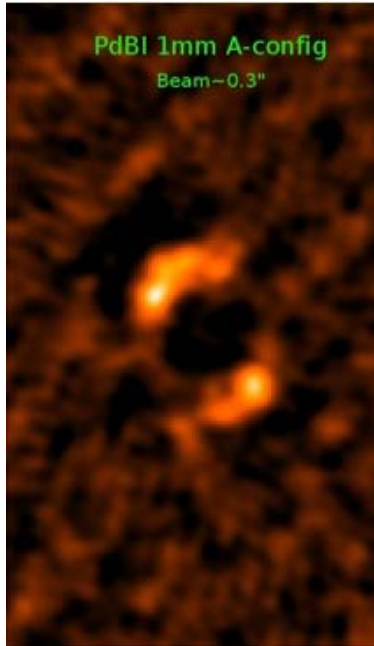


1ère détection
de [NII]205 μ
À grand z

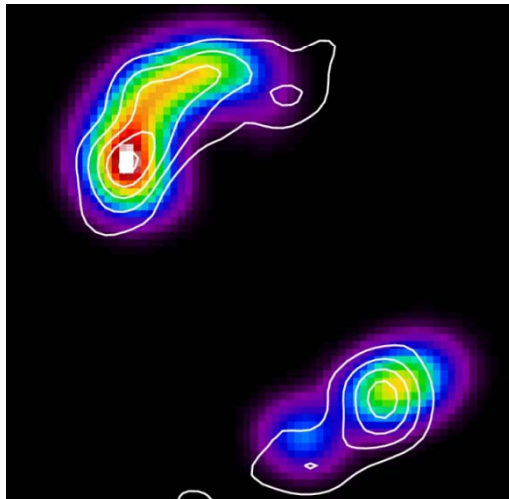


Combes et al 2012

HLSJ091828.6 dans Abell 773

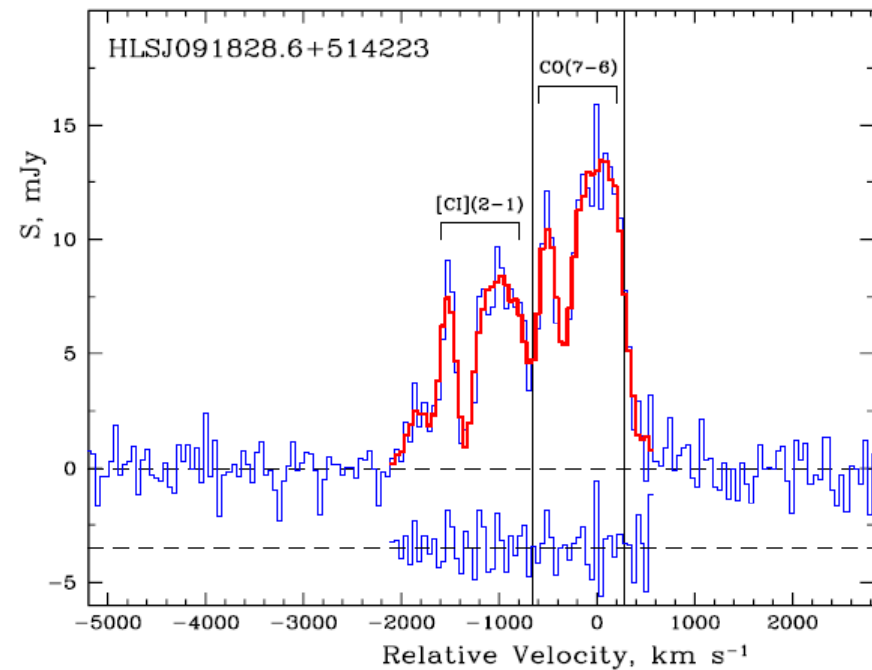


Modèle de lentille, comparé aux observations de continuum mm



Boone et al 2013

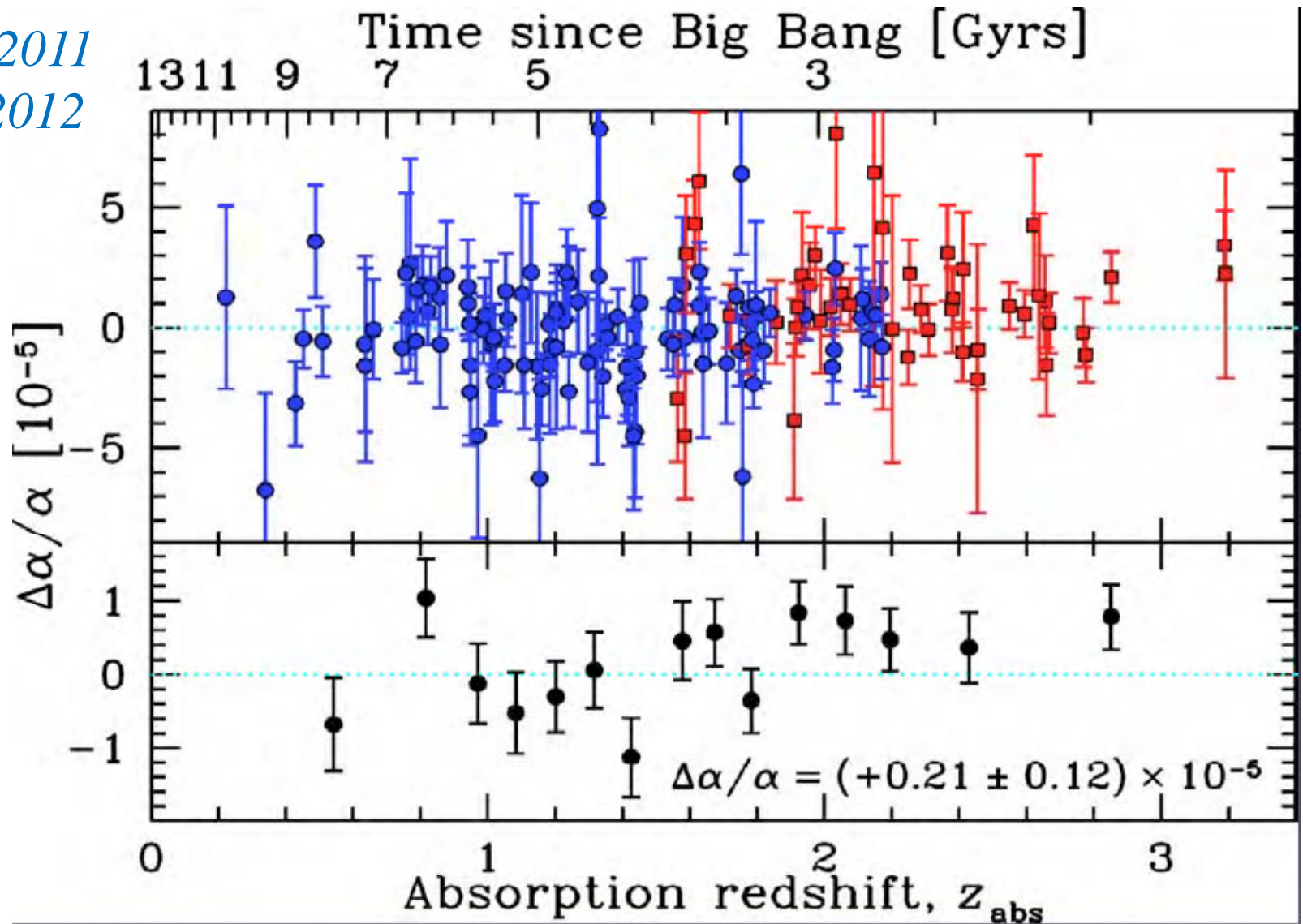
Contraintes sur la variation des constantes fondamentales $\Delta\mu/\mu < 2 \cdot 10^{-5}$
Levshakov, Combes, Boone et al 2012



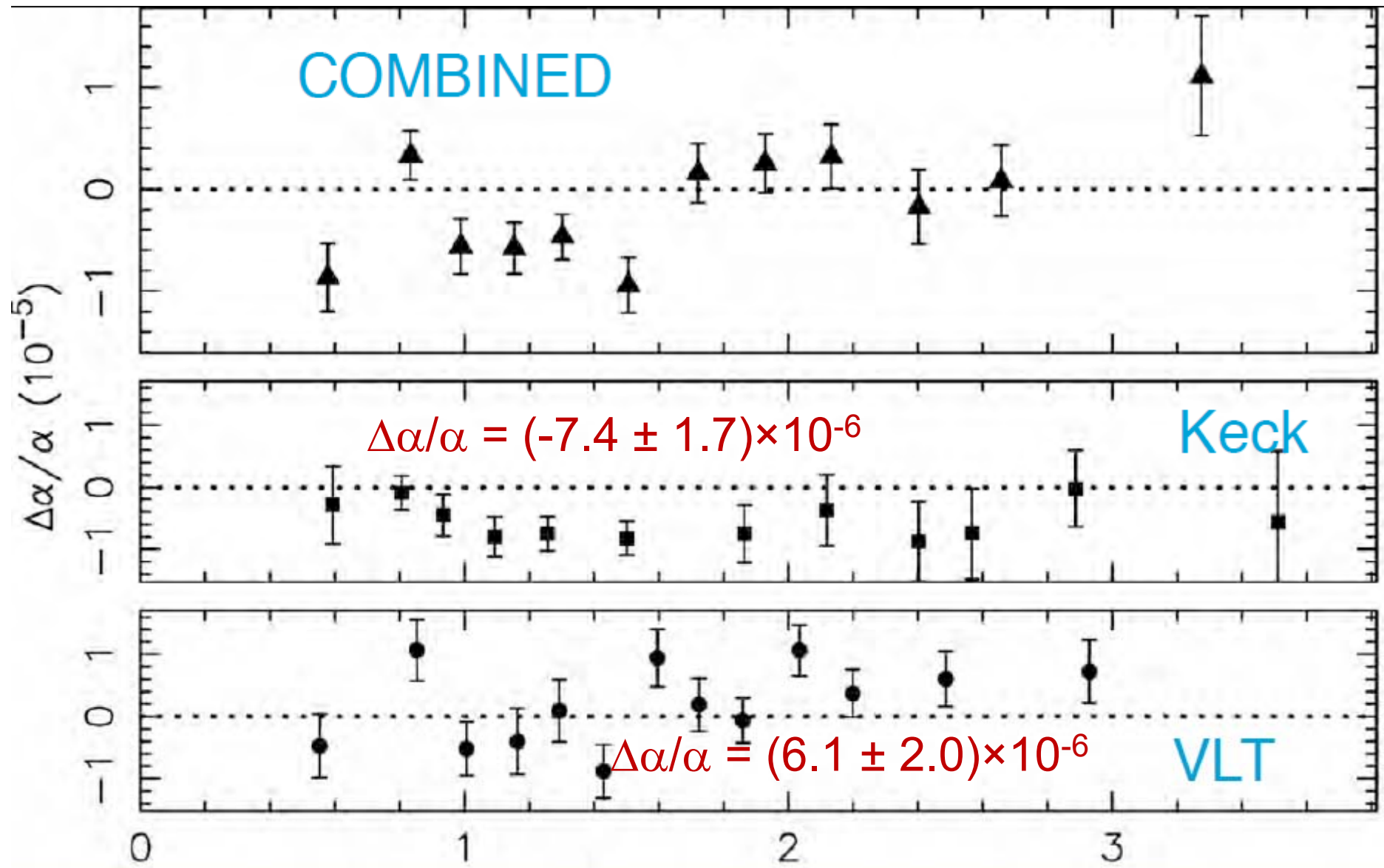
Raies de CI(2-1) et CO(7-6)
dans la même bande

Résultats récents optiques

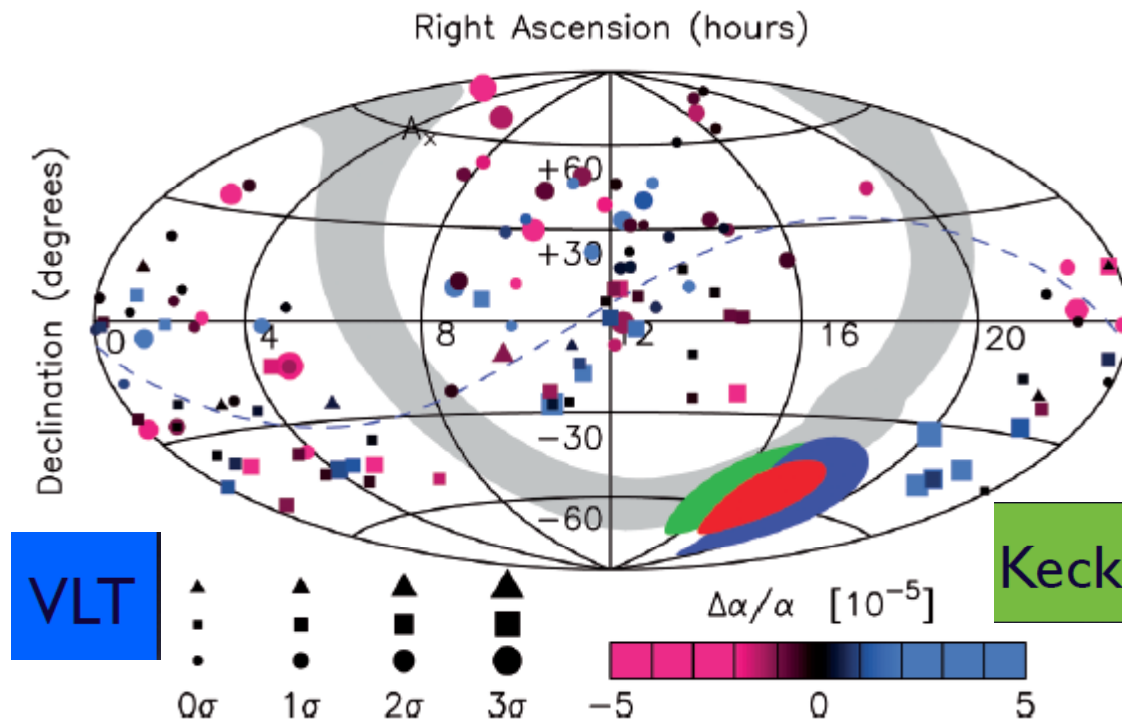
Webb et al 2011
King et al 2012



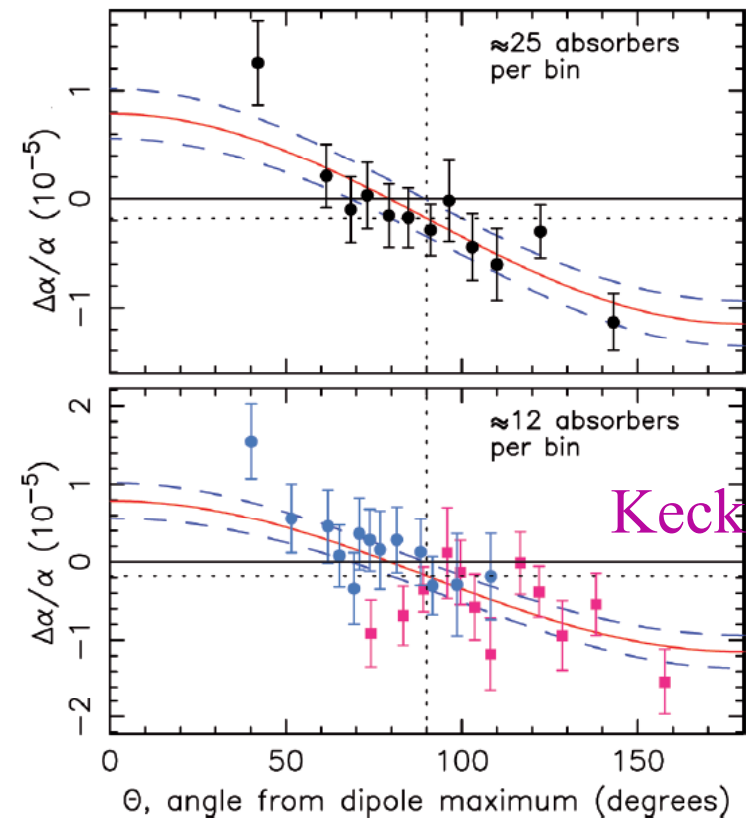
Résultats combinés VLT et Keck



Un dipôle!



$$\Delta\alpha/\alpha = A\cos(\theta) + m$$



Direction

RA= 17.4

DEC= -61

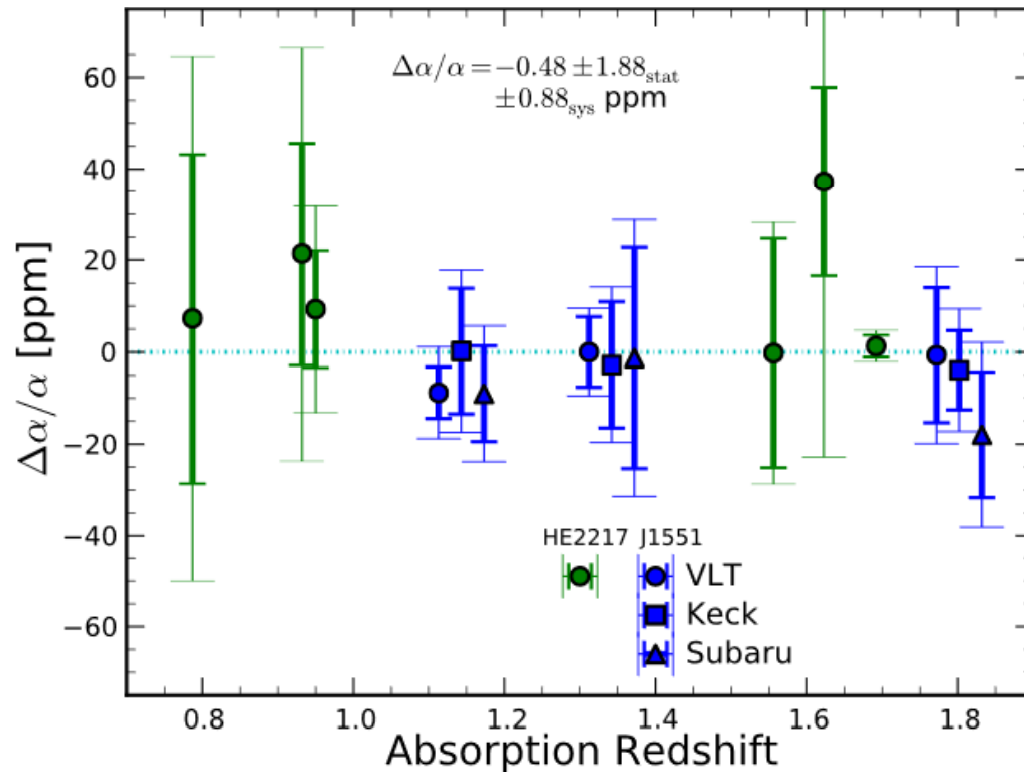
En accord avec Keck + VLT

Accord dans les régions en overlap

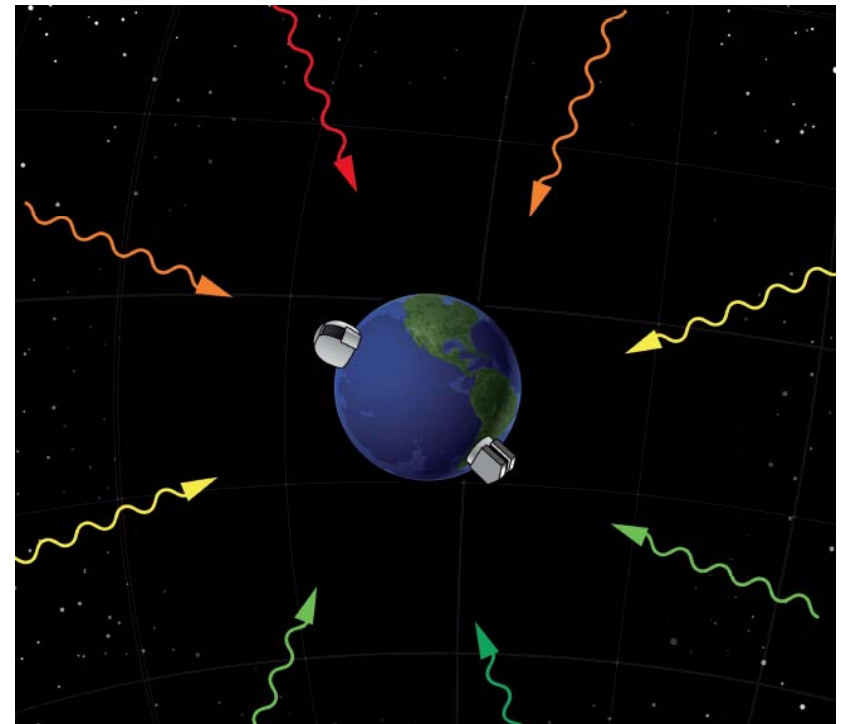
VLT

Comparaison avec un 3ème télescope: SUBARU

$$\langle \Delta\alpha/\alpha \rangle = (-0.5 \pm 2) 10^{-6}$$



Variations selon les directions dans l'Univers ?



Evans et al 2014

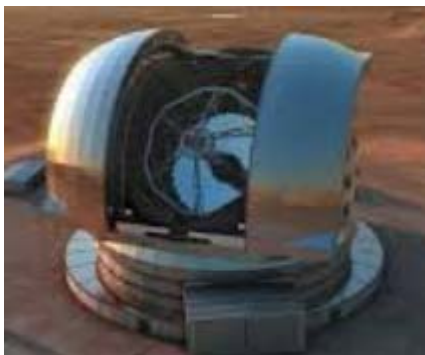
Incompatible avec un dipôle 59

Dans le futur: ESPRESSO



Echelle **S**Pectrograph for
Rocky **E**xoplanets and
Stable **S**pectroscopic
Observations

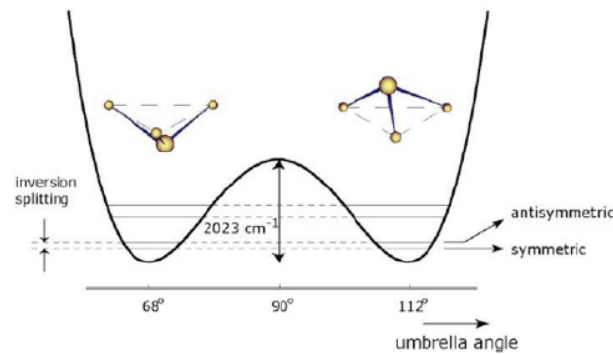
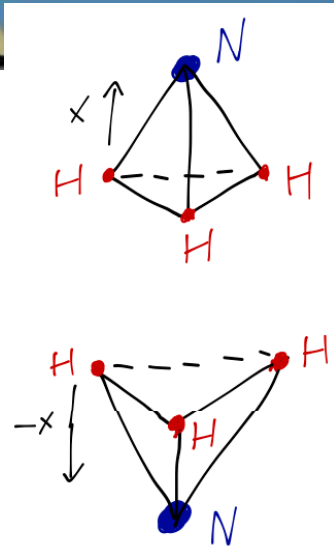
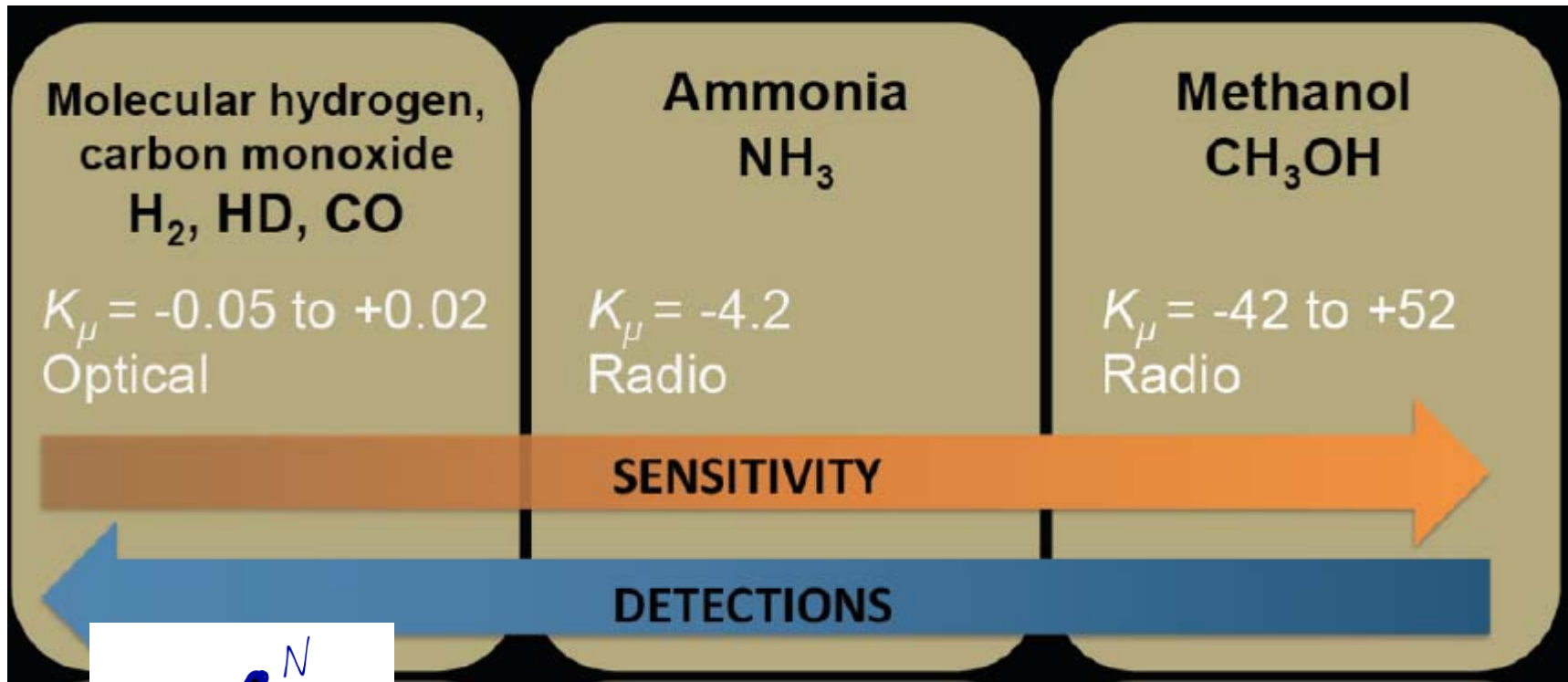
→ La mesure des constantes fondamentales est un des buts principaux de l'instrument



+E-ELT
HIRES



Molécules les plus sensibles K_μ



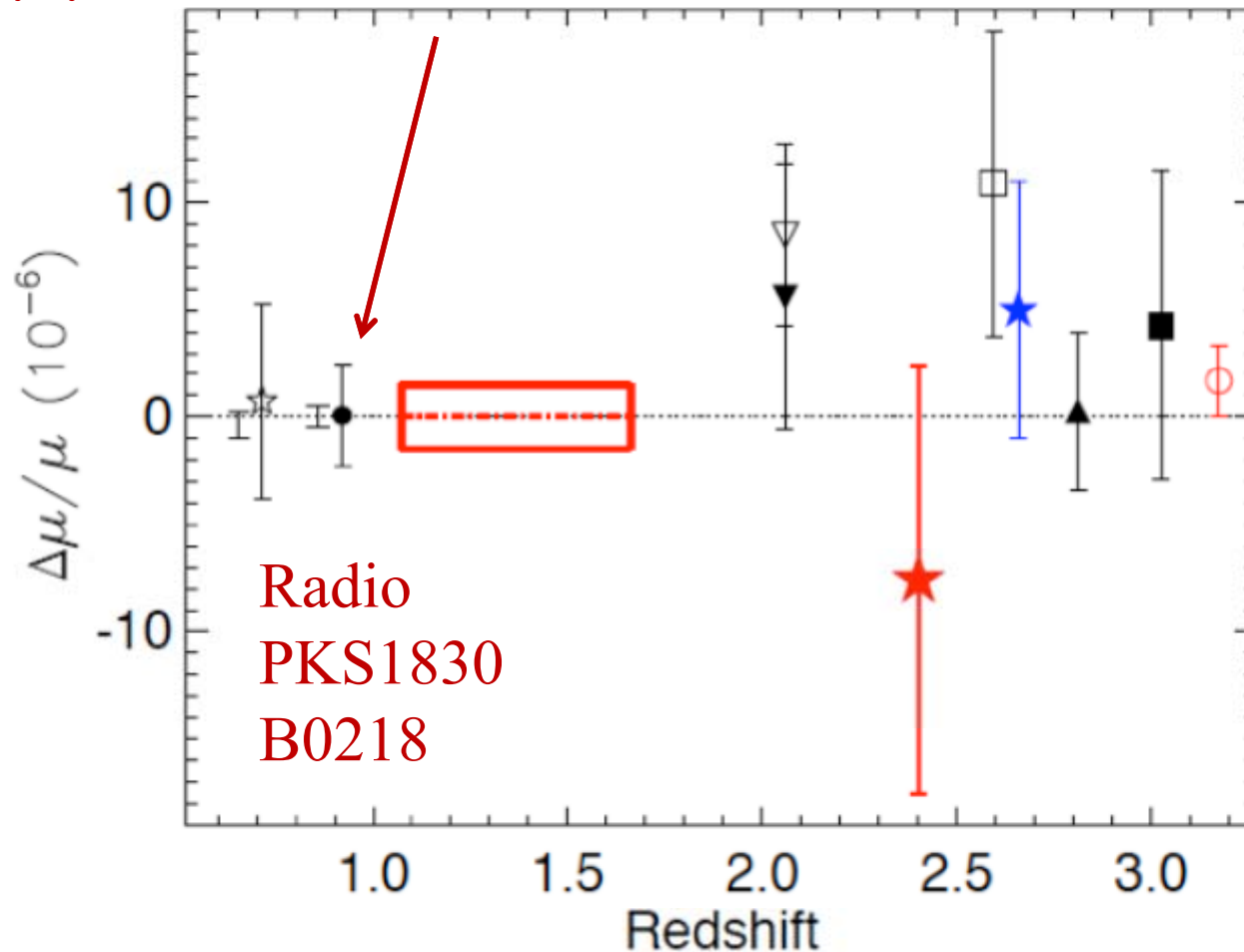
$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = K_\mu \frac{\Delta \mu}{\mu}$$

Transitions d'inversion
du parapluie NH_3

Variation du rapport des masses $\mu = m_e/m_p$

$\langle \Delta\mu/\mu \rangle = (0.1 \pm 0.5) 10^{-6}$

$\langle \Delta\mu/\mu \rangle = (3.4 \pm 2.7) 10^{-6}$



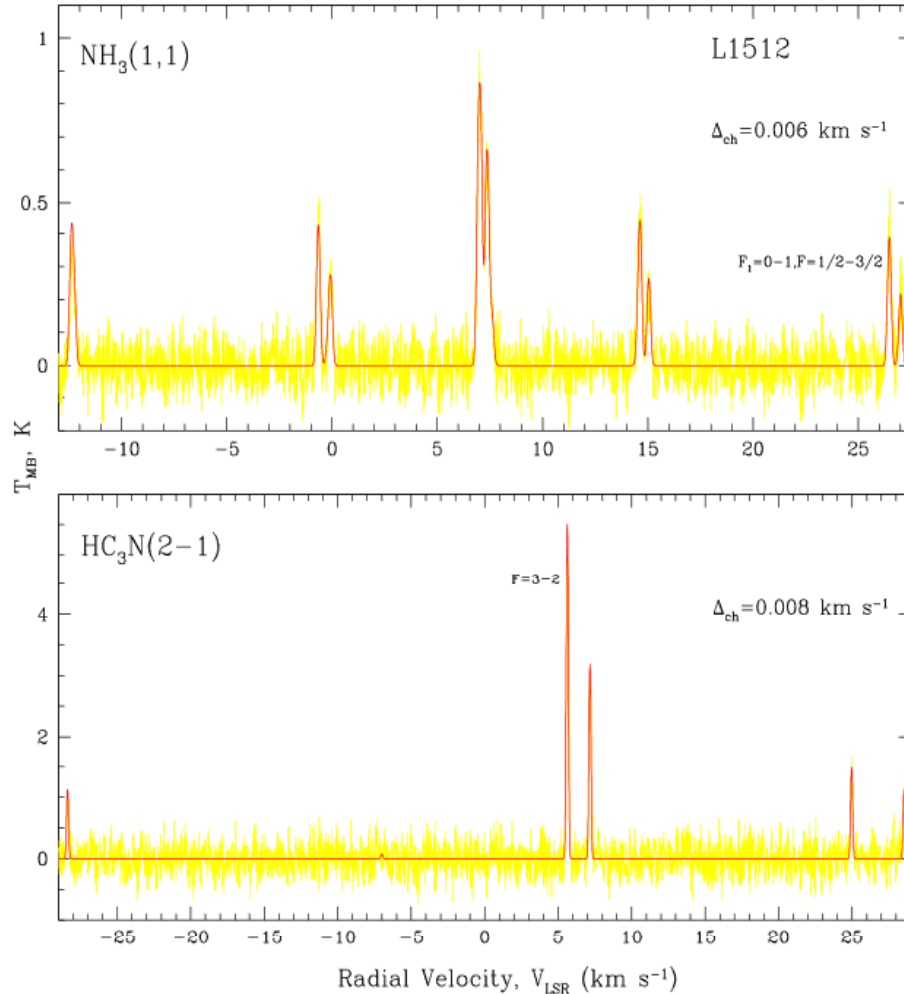
H_2
Raies de vibration
et rotation
dépendent de μ
Raies électroniques
de α

Bagdonaitė et al
2013, 14, 15

H_2 en optique *Noterdaeme et al 2008, Rahmani et al 2013*

Variations dans la Voie lactée

Ammoniac NH_3 et méthanol CH_3OH



$$\langle \Delta\mu/\mu \rangle < 2 \cdot 10^{-8}$$

Raies très fines, haute
résolution spectrale

(Medicina 32m, Effelsberg 100m)

Levshakov et al 2013,
Molaro et al 2013

Conclusions

→ La variation des constantes permet d'explorer une nouvelle physique au-delà du modèle standard (5ème force, quintessence, GUTs)

→ α et $\mu = m_e/m_p$ sont accessibles par de multiples raies Électroniques, rotation, vibration, et leur inter-comparaison

→ Des limites supérieures au niveau de 10^{-6} en α et μ à grand z (+ μ à 10^{-7} à bas z , $2 \cdot 10^{-8}$ localement)

Un dipôle spatial un peu fantaisiste

→ ESPRESSO au VLT et HIRES sur E-ELT permettront de gagner 1-2 ordres de grandeur

→ ALMA (interféromètre mm, ~60 antennes de 12m + 7m)

Notre cône de lumière passé

