

El Medio Intergaláctico

Una Introducción

www.das.uchile.cl/~slopez/escuela/QAL



Sebastián López
Departamento de Astronomía
Universidad de Chile



◆ Contenidos

- ◆ Historia

- ◆ Fenomenología

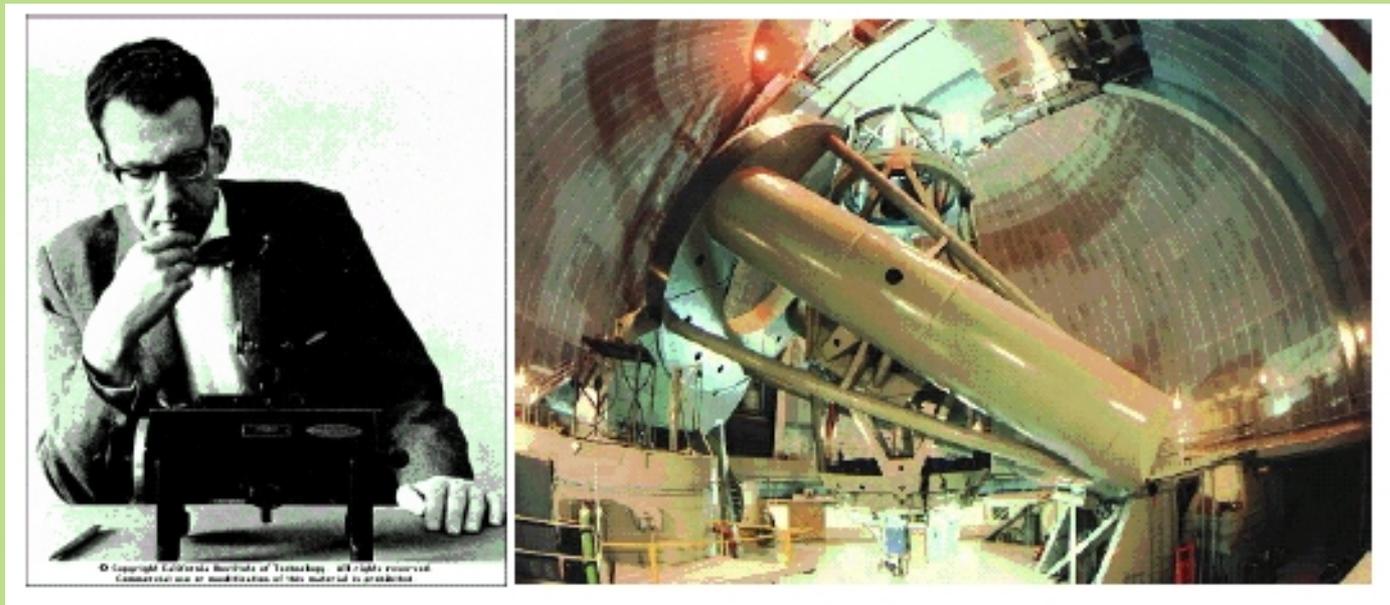
- ◆ Surveys

- ◆ Aplicaciones

- ◆ Brotes de Rayos-Gamma

◆ Historia

- ◆ Los “objetos cuasi-estelares” (QSOs) fueron descubiertos por Maarten Schmidt en 1963 usando el telescopio de 5m de Monte Palomar.

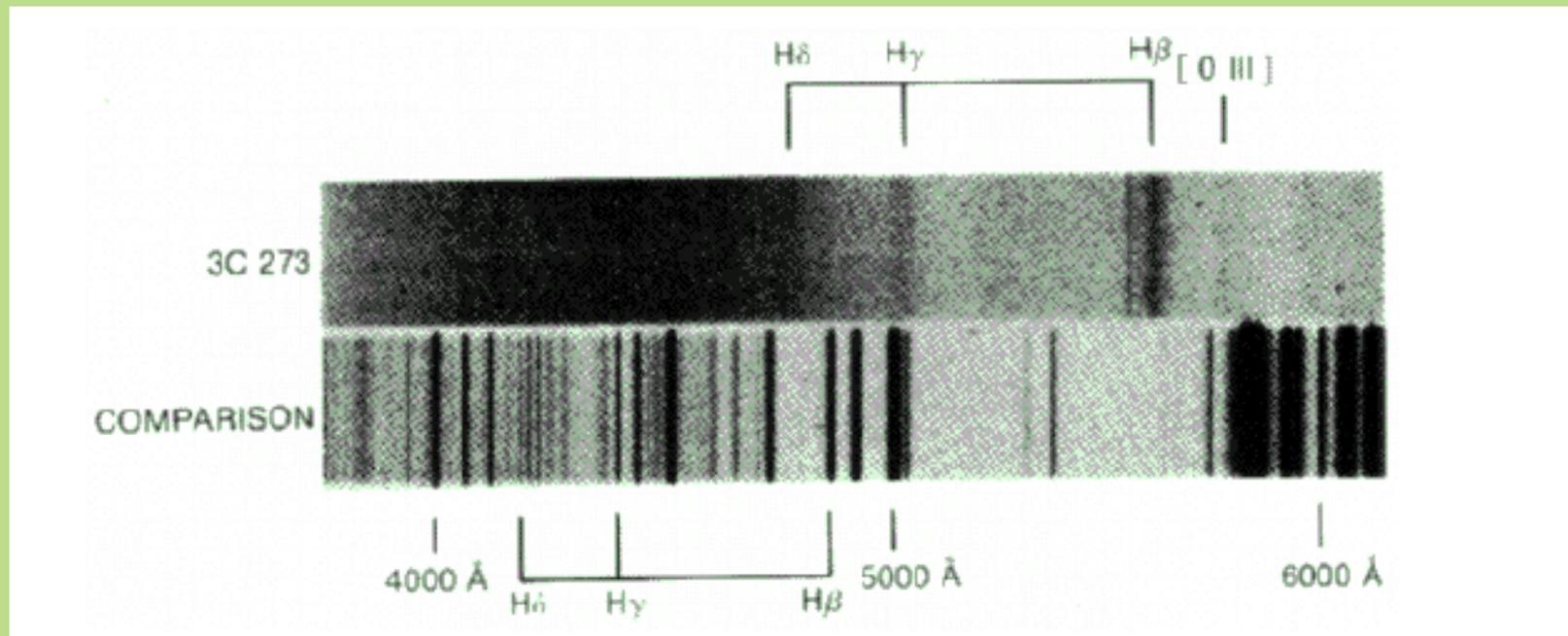


◆ Historia

- ◆ El primer espectro de un cuasar (3C273) reveló un redshift de $z=0.15$ y una distribución de energía distinta a un cuerpo negro.

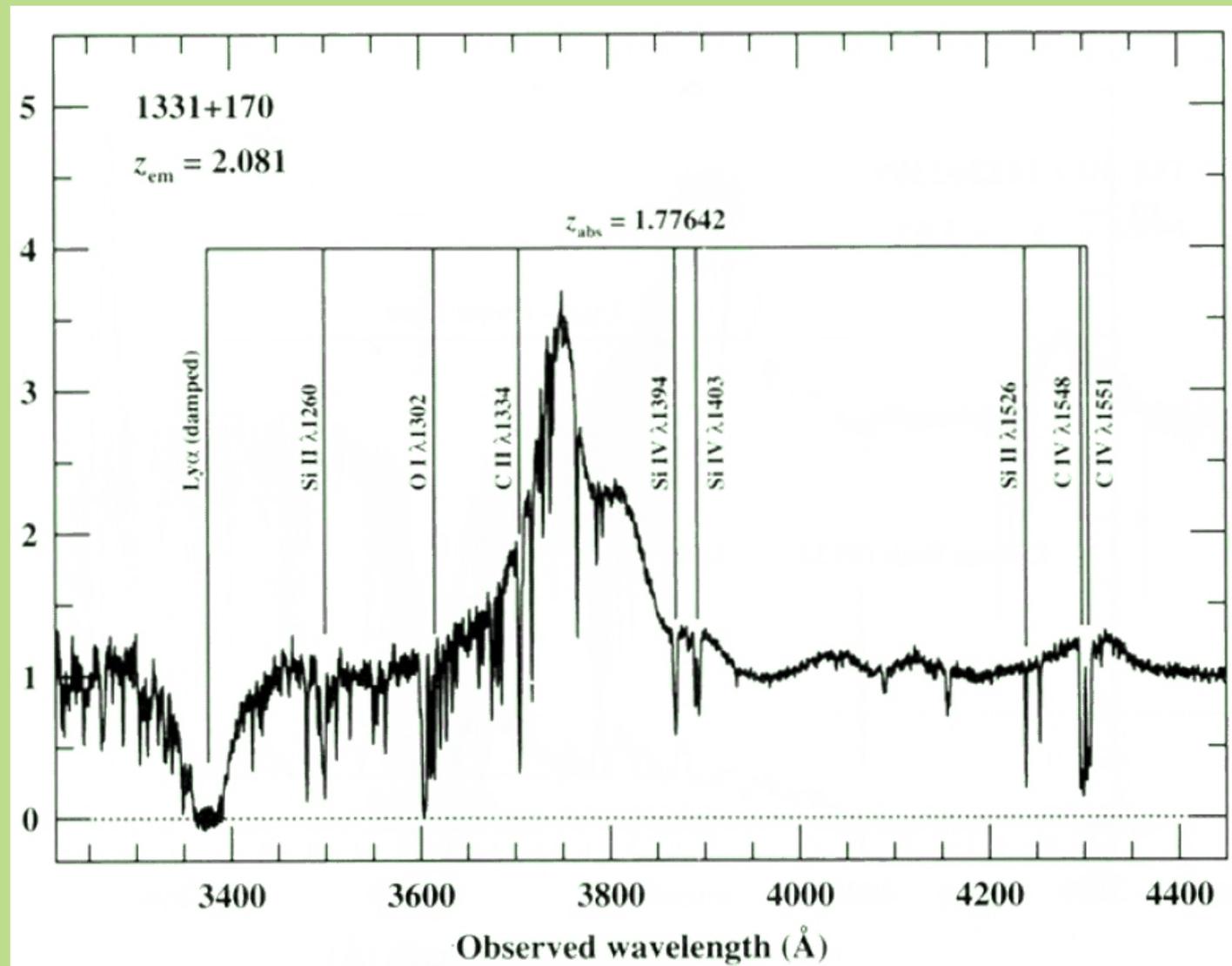
$$\lambda_{\text{obs}} / \lambda_0 = 1+z$$

$$5600/4861.3=1.15=1+z$$



◆ Historia

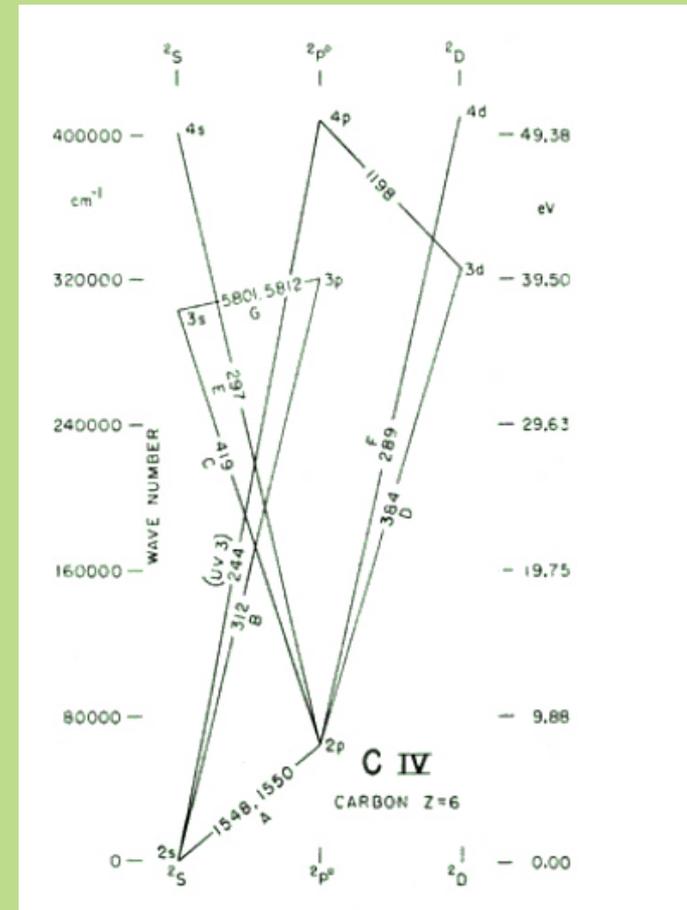
- ◆ Algunos años después de esta identificación se descubrieron **lineas de absorción** en los espectros de QSOs.



◆ Historia

- ◆ Era claro que las líneas eran producidas por transiciones atómicas permitidas (“de resonancia”).

H I [1s]	1216 Å
C IV [1s ² 2s]	1548, 1551 Å
Na I [{1s ² 2s ² 2p ⁶ }3s]	5890, 5896 Å
Mg II [{1s ² 2s ² 2p ⁶ }3s]	2796, 2803 Å
K I [{1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3s ⁶ }4s]	7665, 7645 Å
Ca II [{1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3s ⁶ }4s]	3934, 3968 Å



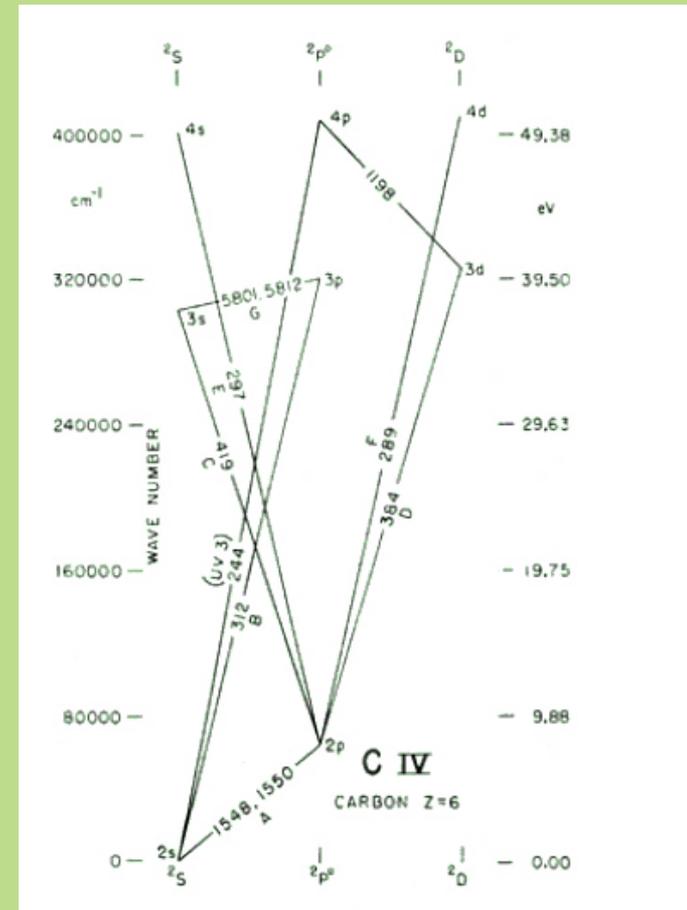
◆ Historia

- ◆ Era claro que las líneas eran producidas por transiciones atómicas permitidas (“de resonancia”).

Baja ionización

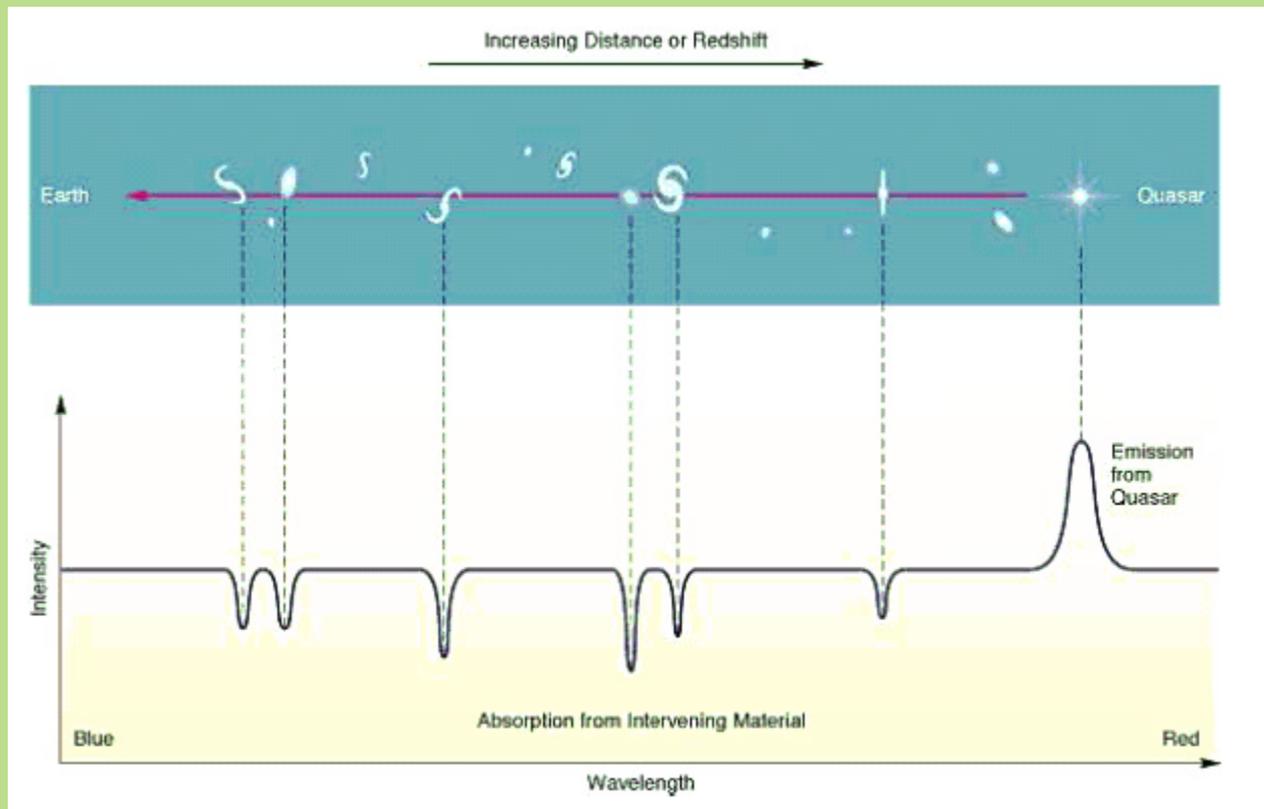
Alta ionización

H I	[1s]	1216 Å
C IV	[1s ² 2s]	1548, 1551 Å
Na I	[[1s ² 2s ² 2p ⁶]{3s}	5890, 5896 Å
Mg II	[[1s ² 2s ² 2p ⁶]{3s}	2796, 2803 Å
K I	[[1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3s ⁶]{4s}	7665, 7645 Å
Ca II	[[1s ² 2s ² 2p ⁶ 3s ² 3s ⁶]{4s}	3934, 3968 Å



◆ Historia

- ◆ Se especuló que las líneas de absorción eran producidas por material entre el QSO y el observador, mayoritariamente hidrógeno neutral (HI).
- ◆ También podían ser intrínsecas al cuasar.



$$\lambda_{\text{obs}} / \lambda_0 = 1+z$$

◆ Historia

- ◆ El primer trabajo teórico para explicar tal absorción fue el de Gunn & Peterson.
- ◆ Estos autores consideraron el flujo al azul de la emisión de Ly-alpha del cuasar 3C9 ($z=2.01$)
- ◆ Derivaron un límite a la cantidad de HI que podría estar presente en el **medio intergaláctico**.

NOTES

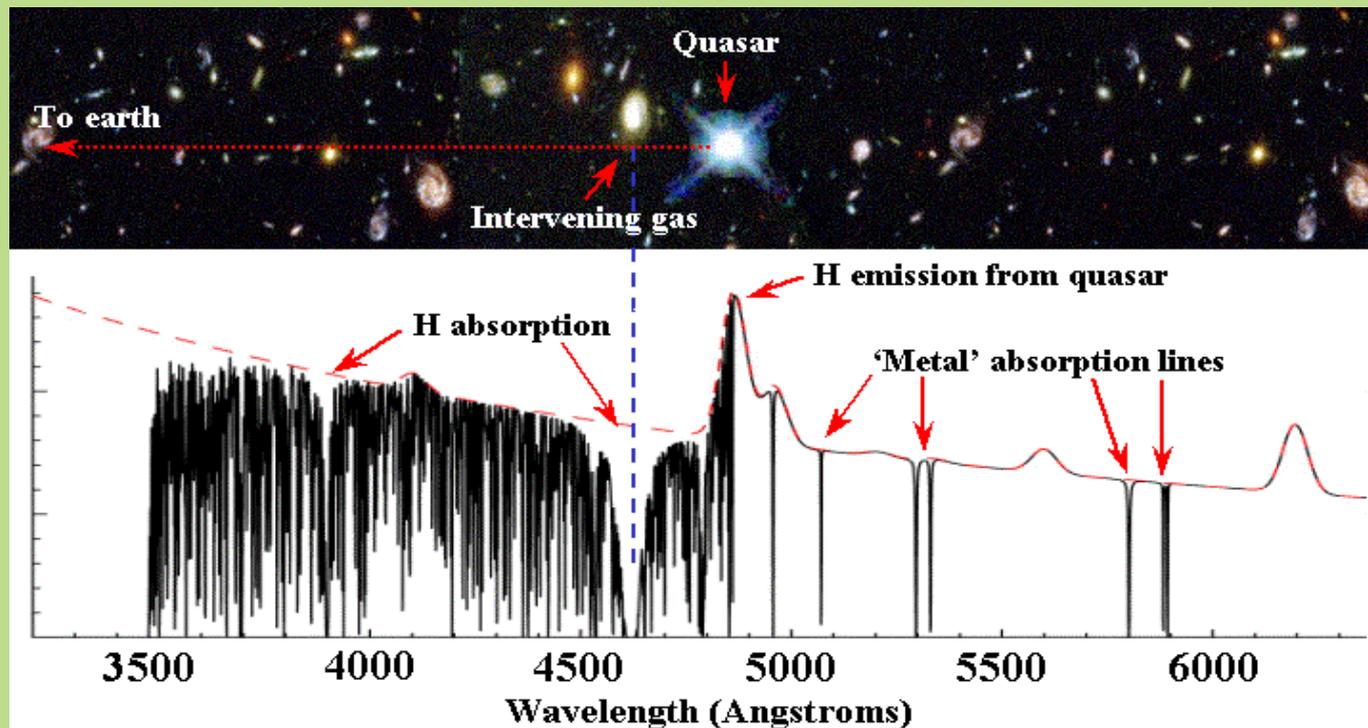
ON THE DENSITY OF NEUTRAL HYDROGEN IN INTERGALACTIC SPACE

Recent spectroscopic observations by Schmidt (1965) of the quasi-stellar source 3C 9, which is reported by him to have a redshift of 2.01, and for which Lyman- α is in the visible spectrum, make possible the determination of a new very low value for the density of neutral hydrogen in intergalactic space. It is observed that the continuum of the source continues (though perhaps somewhat weakened) to the blue of Ly- α ; the line as seen on the plates has some structure but no obvious asymmetry. Consider, however, the fate of photons emitted to the blue of Ly- α . As we move away from the source along the line of sight, the source becomes redshifted to observers locally at rest in the expansion, and for one such observer, the frequency of any such photon coincides with the rest frequency of Ly- α in his frame and can be scattered by neutral hydrogen in his vicinity. The calculation of the size of the effect is very easily performed as follows:

Gunn & Peterson (1965) ApJ 142 1633

◆ Historia

- ◆ Un segundo trabajo por Bahcall & Salpeter (1966) ApJ 144 847, predice que el material “interviniente” debería producir líneas discretas, detectadas posteriormente por varios investigadores (e.g., Greenstein & Schmidt 1967 ApJL 148 13)



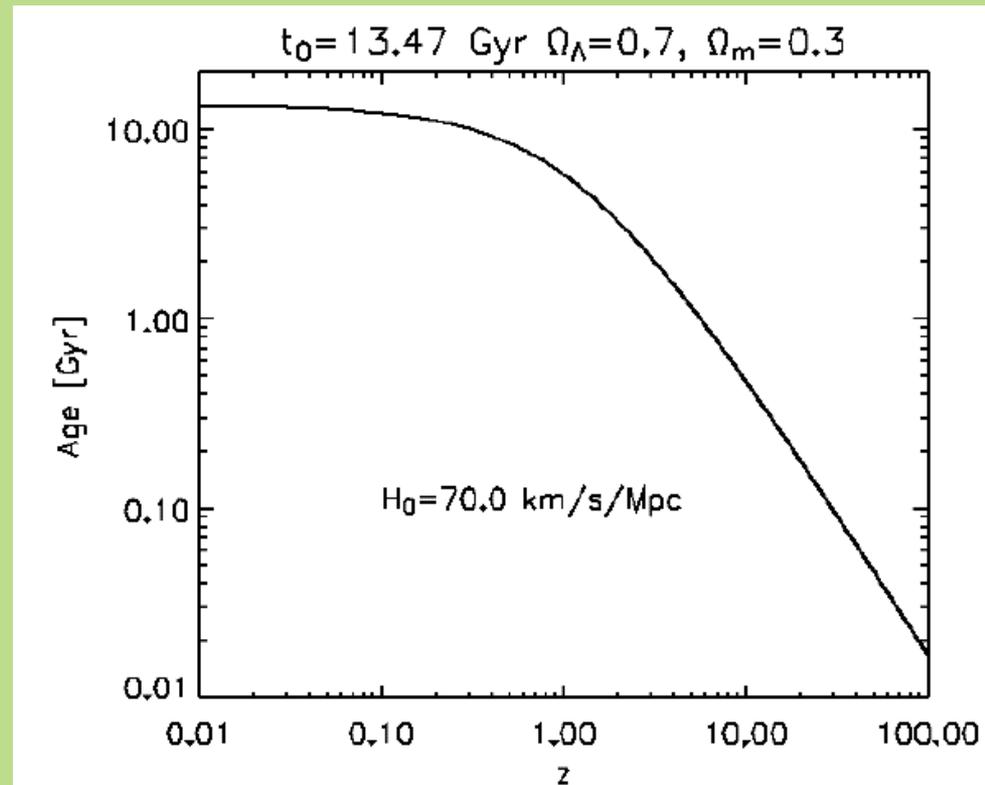
- ◆ Lectura 1:
 - ◆ Gunn & Peterson (1965) ApJ 142 1633
 - ◆ Bahcall & Salpeter (1966) ApJ 144 847
- ◆ Enviar resumen de 1/2 pagina c/u (PDF)
- ◆ Lunes 17 de Agosto de 2009

◆ Historia

- ◆ En unos pocos años varios “sistemas de absorción” habían sido descubiertos.
- ◆ Bahcall & Spitzer (1969 ApJL 156 63) proponen que tales sistemas de absorción con metales deberían producirse en halos de galaxias normales (a alto redshift!).
- ◆ Al acumularse más y más datos, pronto fue evidente que los sistemas de absorción tenían que producirse en material galáctico e intergaláctico entre el QSO y el observador (“*intervening*”), y no en el QSO mismo.

◆ Historia

- ◆ Hoy en día está claro que son sistemas a distancias cosmológicas y no relacionados con el cuasar, aunque algunos sistemas sí están asociados al cuasar.
- ◆ Esto nos permite estudiar el gas de galaxias a cualquier redshift menor que el cuasar e independientemente del brillo de éstos.



Fukugita, Hogan & Peebles (1998) “*The Cosmic Baryon Budget*”

TABLE 3
THE BARYON BUDGET

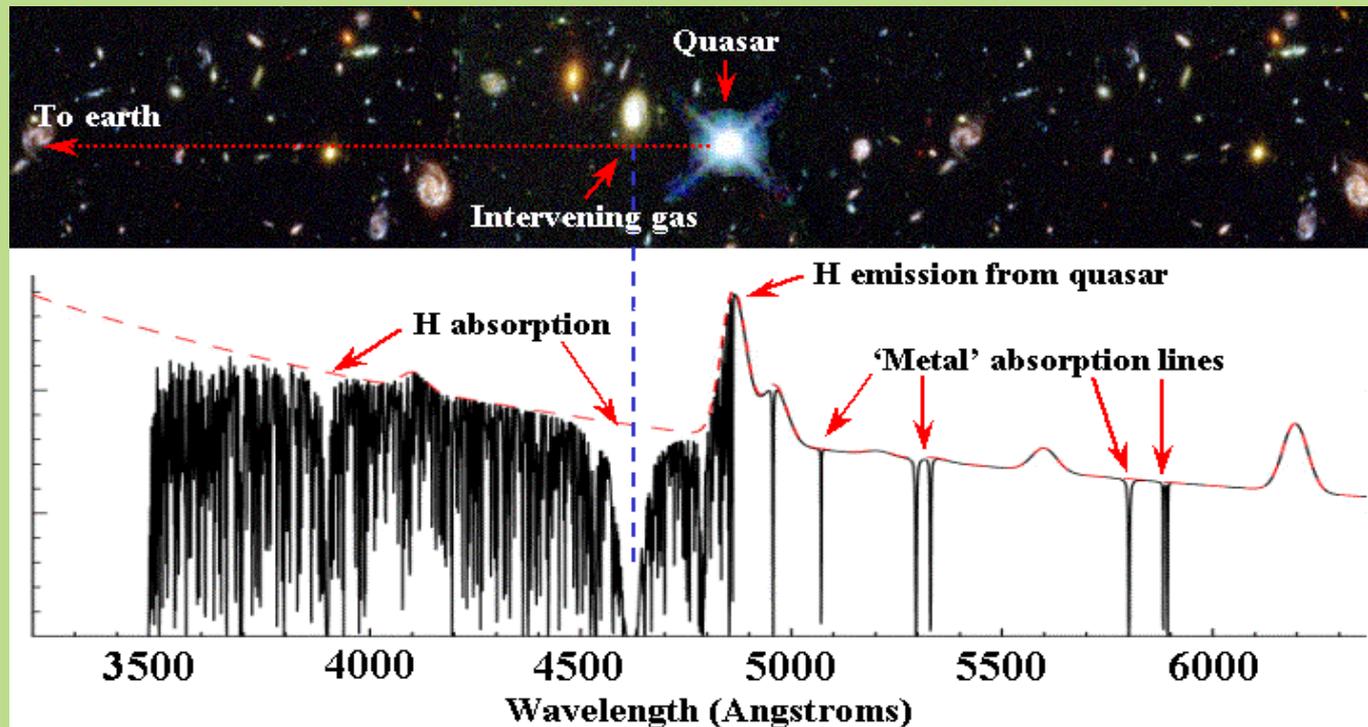
Ly-alpha forest 90% !

Component	Central	Maximum	Minimum	Grade ^a
Observed at $z \approx 0$				
1. Stars in spheroids	0.0026 h_{70}^{-1}	0.0043 h_{70}^{-1}	0.0014 h_{70}^{-1}	A
2. Stars in disks	0.00086 h_{70}^{-1}	0.00129 h_{70}^{-1}	0.00051 h_{70}^{-1}	A-
3. Stars in irregulars	0.000069 h_{70}^{-1}	0.000116 h_{70}^{-1}	0.000033 h_{70}^{-1}	B
4. Neutral atomic gas	0.00033 h_{70}^{-1}	0.00041 h_{70}^{-1}	0.00025 h_{70}^{-1}	A
5. Molecular gas	0.00030 h_{70}^{-1}	0.00037 h_{70}^{-1}	0.00023 h_{70}^{-1}	A-
6. Plasma in clusters	0.0026 $h_{70}^{-1.5}$	0.0044 $h_{70}^{-1.5}$	0.0014 $h_{70}^{-1.5}$	A
7a. Warm plasma in groups	0.0056 $h_{70}^{-1.5}$	0.0115 $h_{70}^{-1.5}$	0.0029 $h_{70}^{-1.5}$	B
7b. Cool plasma	0.002 h_{70}^{-1}	0.003 h_{70}^{-1}	0.0007 h_{70}^{-1}	C
7'. Plasma in groups	0.014 h_{70}^{-1}	0.030 h_{70}^{-1}	0.0072 h_{70}^{-1}	B
8. Sum (at $h = 70$ and $z \approx 0$).....	0.021	0.041	0.007	...
Gas components at $z \approx 3$				
9. Damped absorbers	0.0015 h_{70}^{-1}	0.0027 h_{70}^{-1}	0.0007 h_{70}^{-1}	A-
10. Ly α forest clouds	0.04 $h_{70}^{-1.5}$	0.05 $h_{70}^{-1.5}$	0.01 $h_{70}^{-1.5}$	B
11. Intercloud gas (He II)	0.01 $h_{70}^{-1.5}$	0.0001 h_{70}^{-1}	B
Abundances of:				
12. Deuterium	0.04 h_{70}^{-2}	0.054 h_{70}^{-2}	0.013 h_{70}^{-2}	A
13. Helium	0.010 h_{70}^{-2}	0.027 h_{70}^{-2}	...	A
14. Nucleosynthesis	0.020 h_{70}^{-2}	0.027 h_{70}^{-2}	0.013 h_{70}^{-2}	...

^a Confidence of evaluation, from A (robust) to C (highly uncertain).

◆ En resumen:

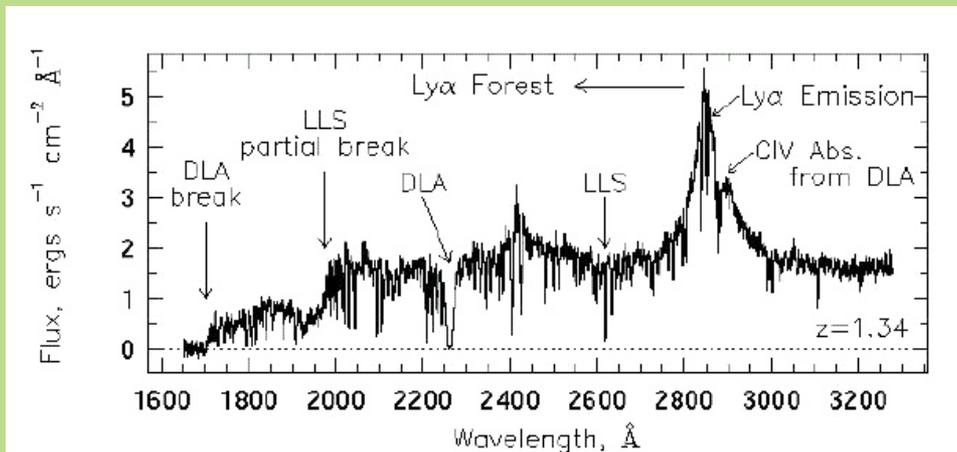
- $\lambda_{\text{obs}} / \lambda_0 = 1+z$
- z_{abs} mapea distancia y look-back time
- El espectro de un QSO muestra muchos sistemas con $z_{\text{abs}} < z_{\text{em}}$ (y algunos con $z_{\text{abs}} \sim z_{\text{em}}$).



© M. T. Murphy

◆ Fenomenología

- ◆ Ly-alpha 1215 \AA se puede observar en el óptico desde $z=1.6$
- ◆ MgII $2796, 2803 \text{ \AA}$ $z > 0.2$
- ◆ CIV $1548, 1550 \text{ \AA}$ $z > 1.1$
- ◆ Lyman-limit “breaks” 912 \AA $z > 2.6$
- ◆ Redshifts menores en el UV (HST)
- ◆ Cada una de estas *especies* revela gas con condiciones físicas particulares de abundancia, densidad, temperatura, y nivel de ionización)

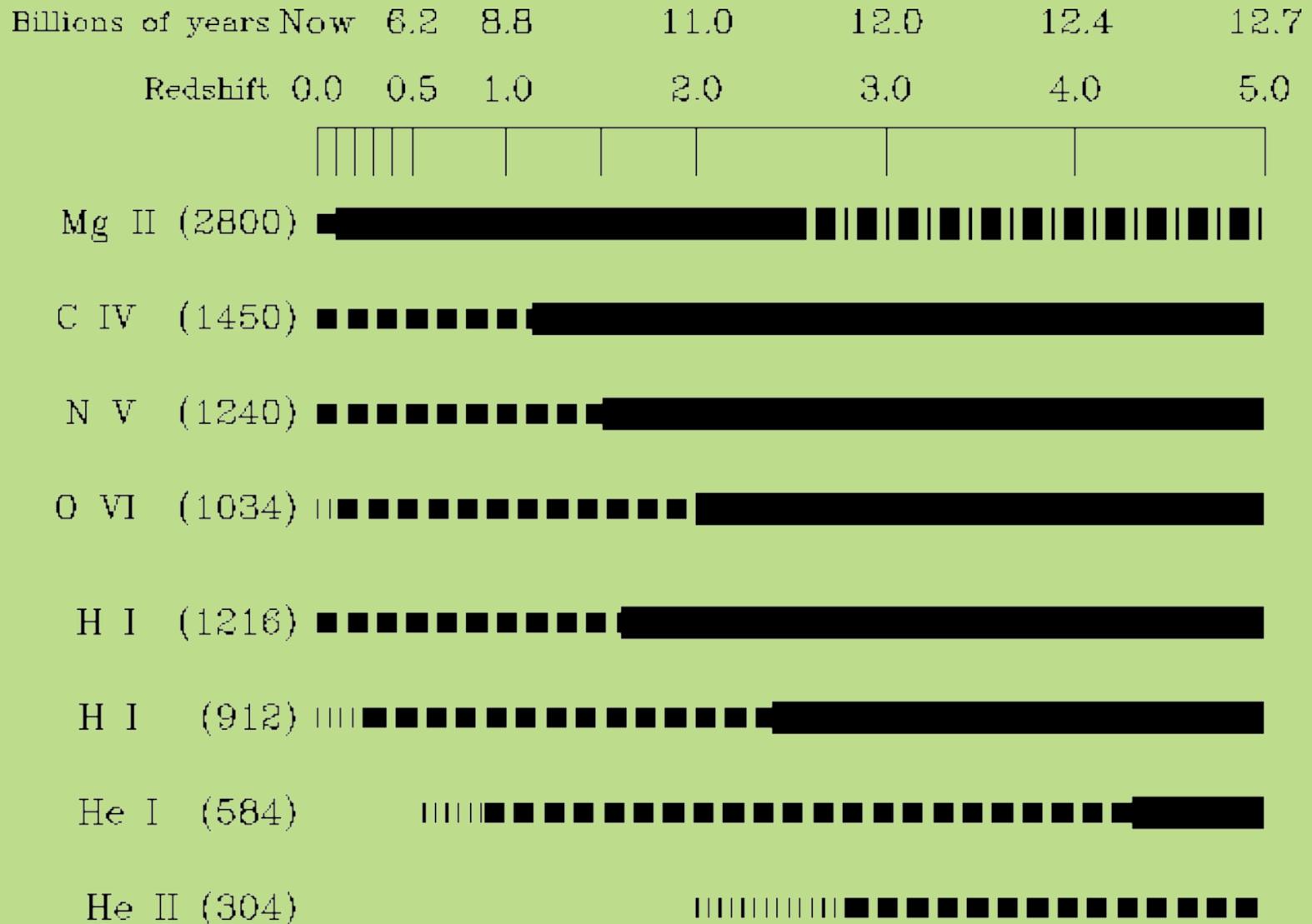


◆ Fenomenología

Líneas UV más comúnmente observadas

Transition	Vacuum Wavelength (Å)
Lyman limit	911.753
Ly γ	972.537
Ly β	1025.722
Ly α	1215.67
Si IV 1393	1393.755
Si IV 1402	1402.770
C IV 1548	1548.187
C IV 1550	1550.772
Fe II 2382	2382.765
Fe II 2600	2600.173
Mg II 2796	2796.352
Mg II 2803	2803.531

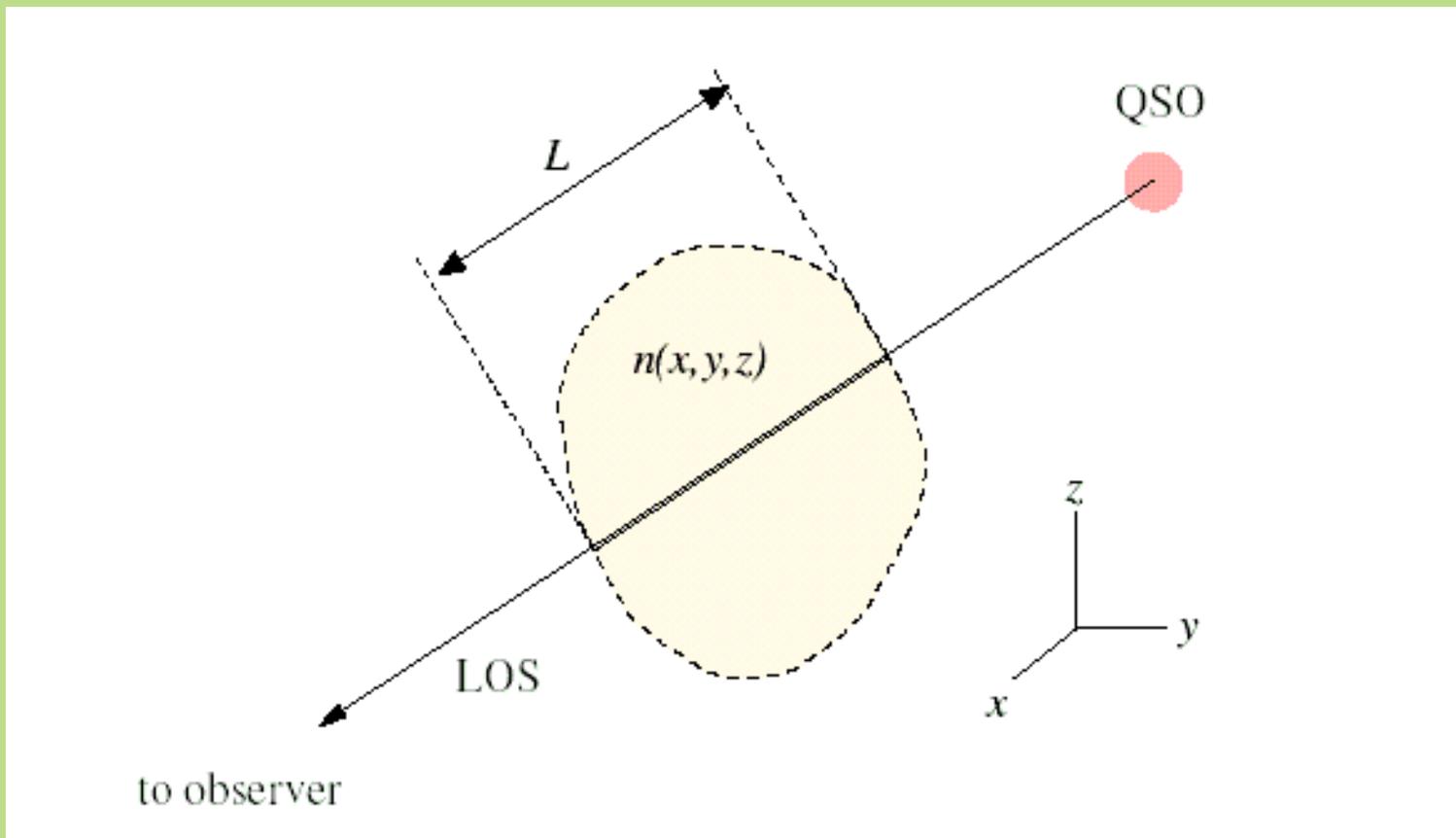
◆ Fenomenología



◆ Formación de una línea

- ◆ Densidad de columna N en cm^{-2}
- ◆ Obtenible del perfil de absorción (n desconocida)

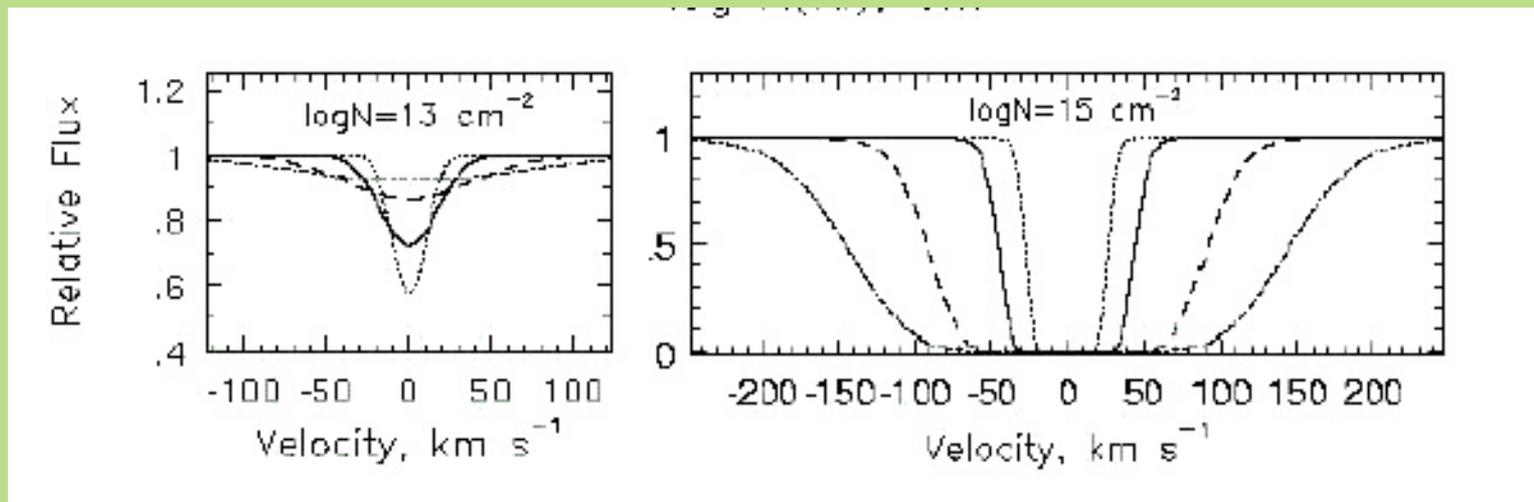
$$N = \int_0^L n(l) dl$$



◆ Formación de una línea

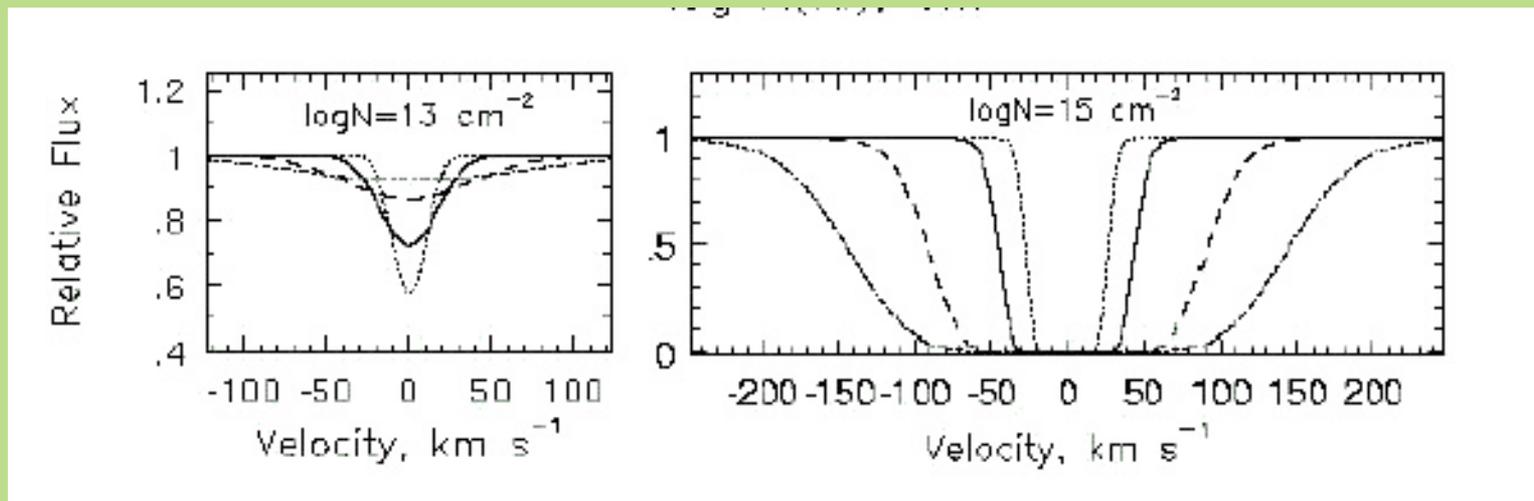
- ◆ “Perfil de Voigt”

- ◆ Cada transición atómica está caracterizada por 3 constantes: longitud de onda, *oscillator strength* (f) y *damping constant*



◆ Formación de una línea

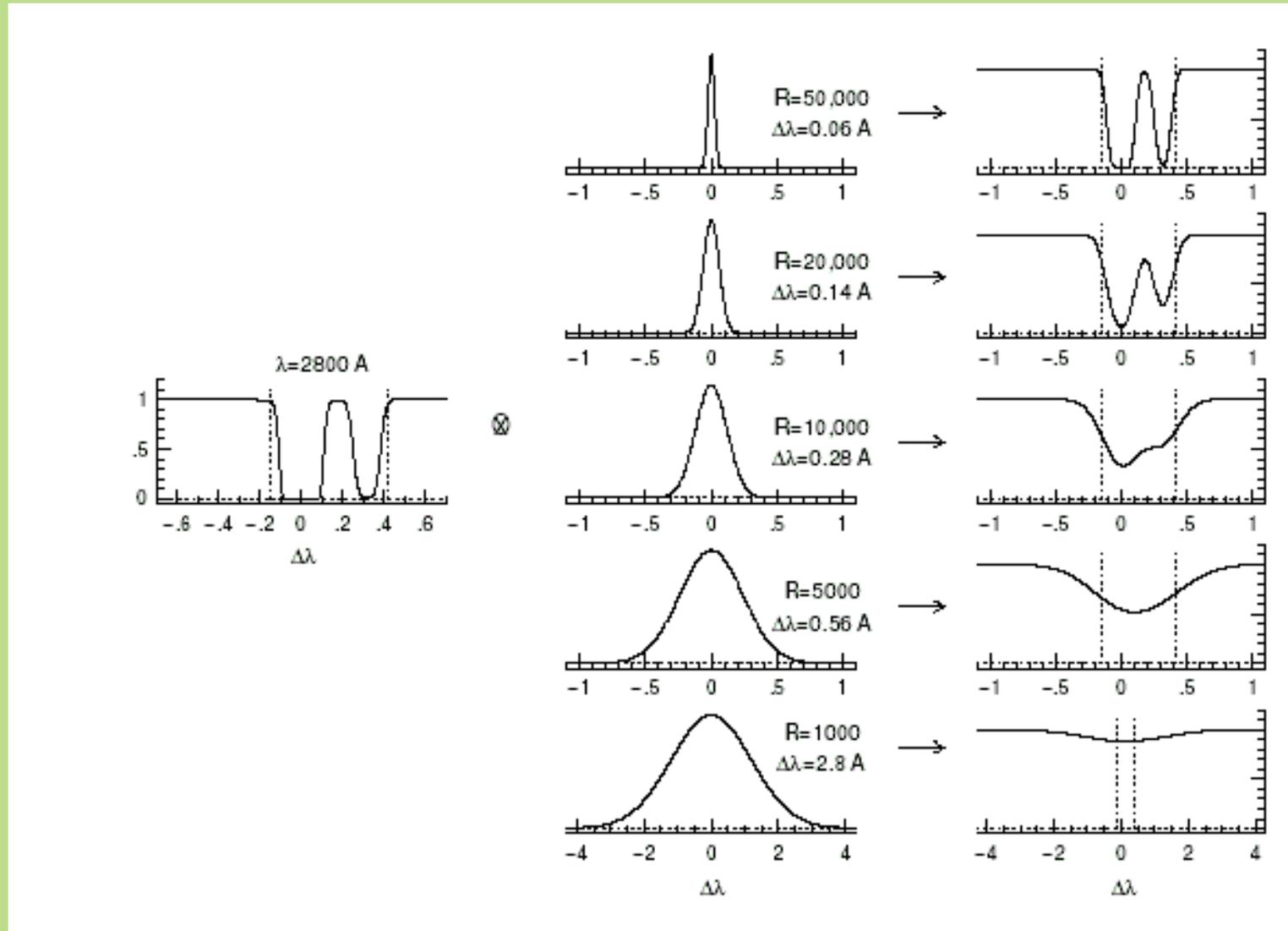
- ◆ Densidad de columna N en cm^{-2}
- ◆ Obtenible del perfil de absorción (n desconocida)
- ◆ transición atómica caracterizada por 3 constantes: longitud de onda, *oscillator strength* (f) y *damping constant*



Ancho de la línea:

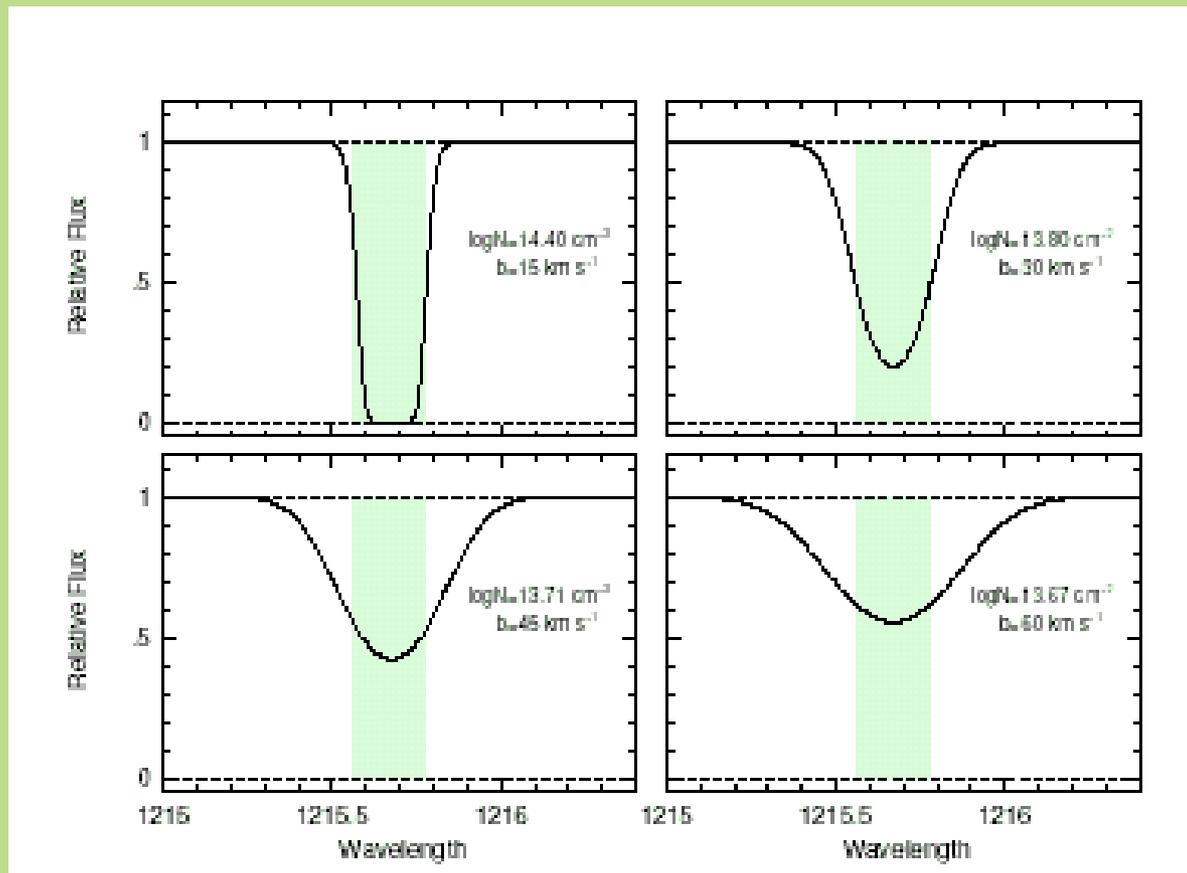
$$b = \left(\frac{2kT}{\mu m_p} \right)^{1/2} = 0.129 \left(\frac{T}{\mu} \right)^{1/2} \text{ km s}^{-1}$$

◆ Perfil instrumental

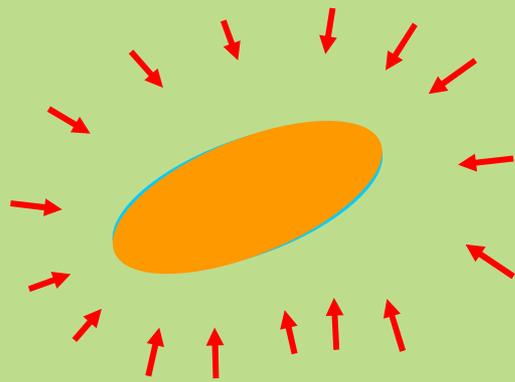


$$\frac{S}{N} = \infty!$$

- ◆ Ancho equivalente, W
 - ◆ *Cantidad positiva*
 - ◆ Unidades de longitud de onda (\AA)
 - ◆ **No depende de resolución espectral.**
 - ◆ $W_0 = W_\lambda / (1+z)$

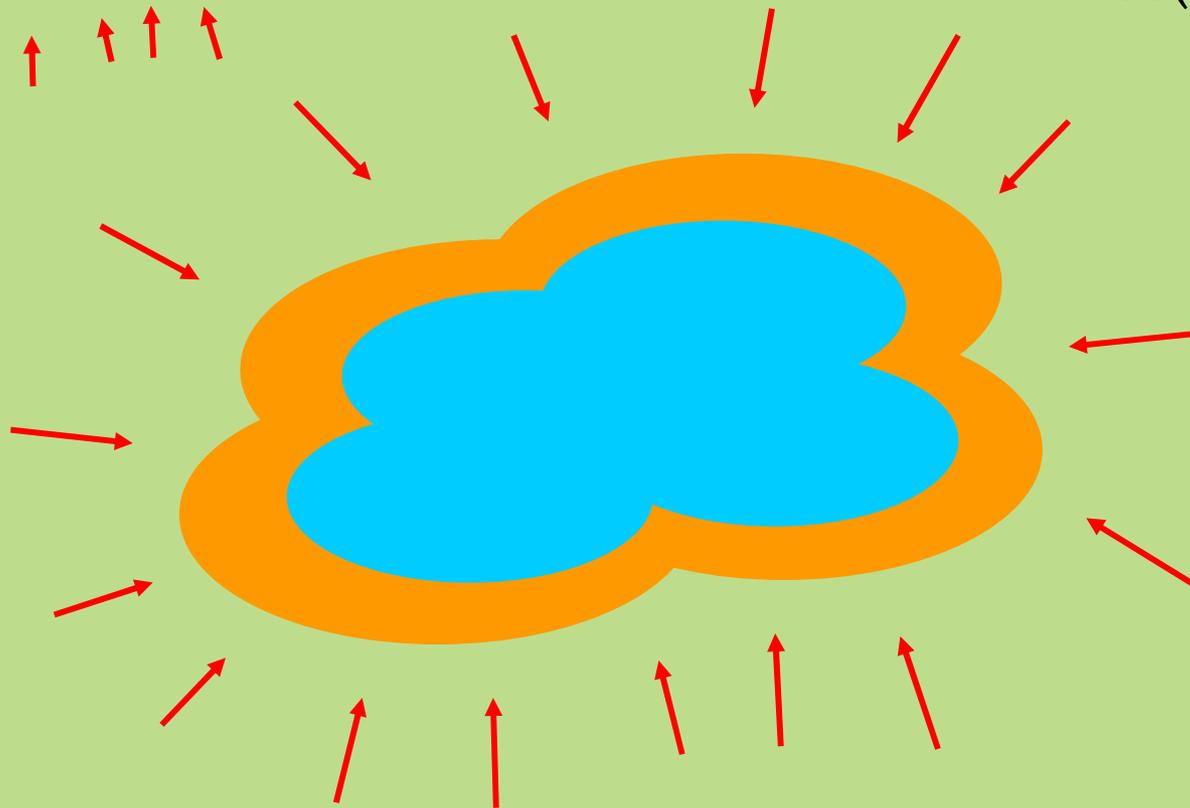


◆ Cuándo permanece neutral una nube

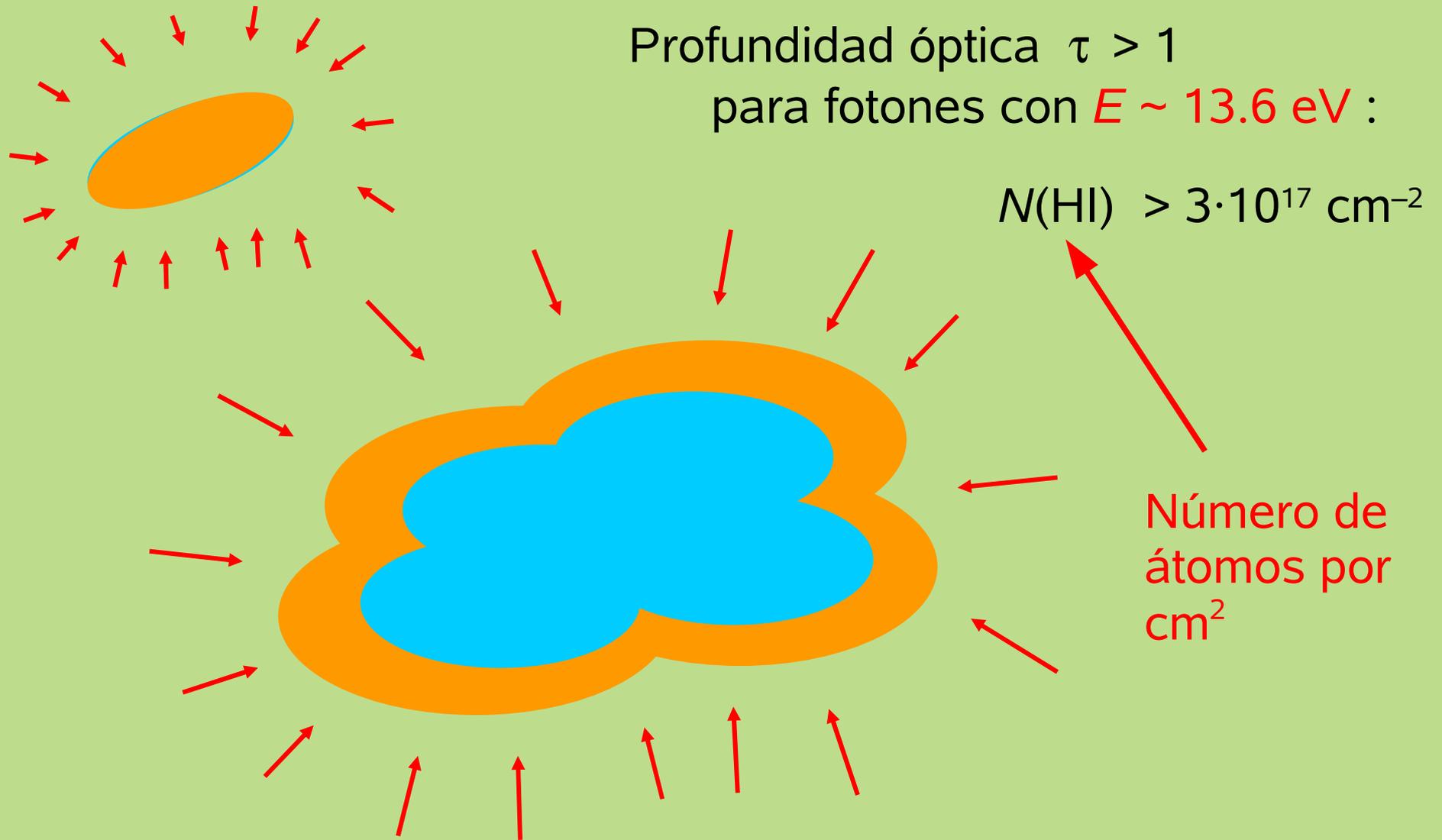


Profundidad óptica $\tau > 1$
para fotones con $E \sim 13.6 \text{ eV}$:

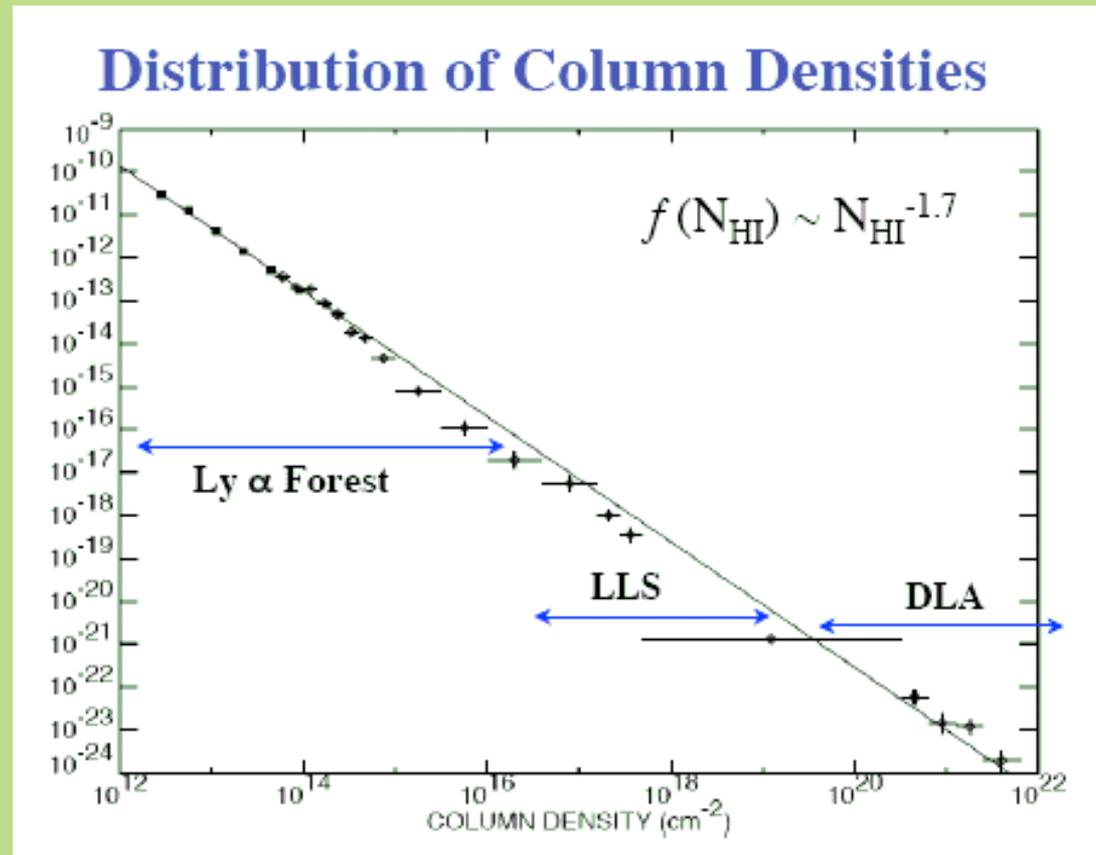
$$N(\text{HI}) > 3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$$



◆ Cuándo permanece neutral una nube



- ◆ Clasificación de los absorbentes por densidad de columna:
 - ◆ **DLAs** (“damped” Ly-a systems): $N_{\text{HI}} > 10^{20.3} \text{ cm}^{-2}$
 - ◆ **LLSs** (Lyman-limit systems): $N_{\text{HI}} > 10^{17} \text{ cm}^{-2}$
 - ◆ **Ly-a forest**: $N_{\text{HI}} < 10^{17} \text{ cm}^{-2}$



◆ Surveys

- ◆ En los años 80 se obtuvieron muchos espectros de QSOs usando grandes surveys

- ◆ LBQS

- ◆ HE/ESO

- ◆ Calán/Tololo

- ◆ Otros recientes (2dF, CLASS, SDSS, etc)

← ~1000

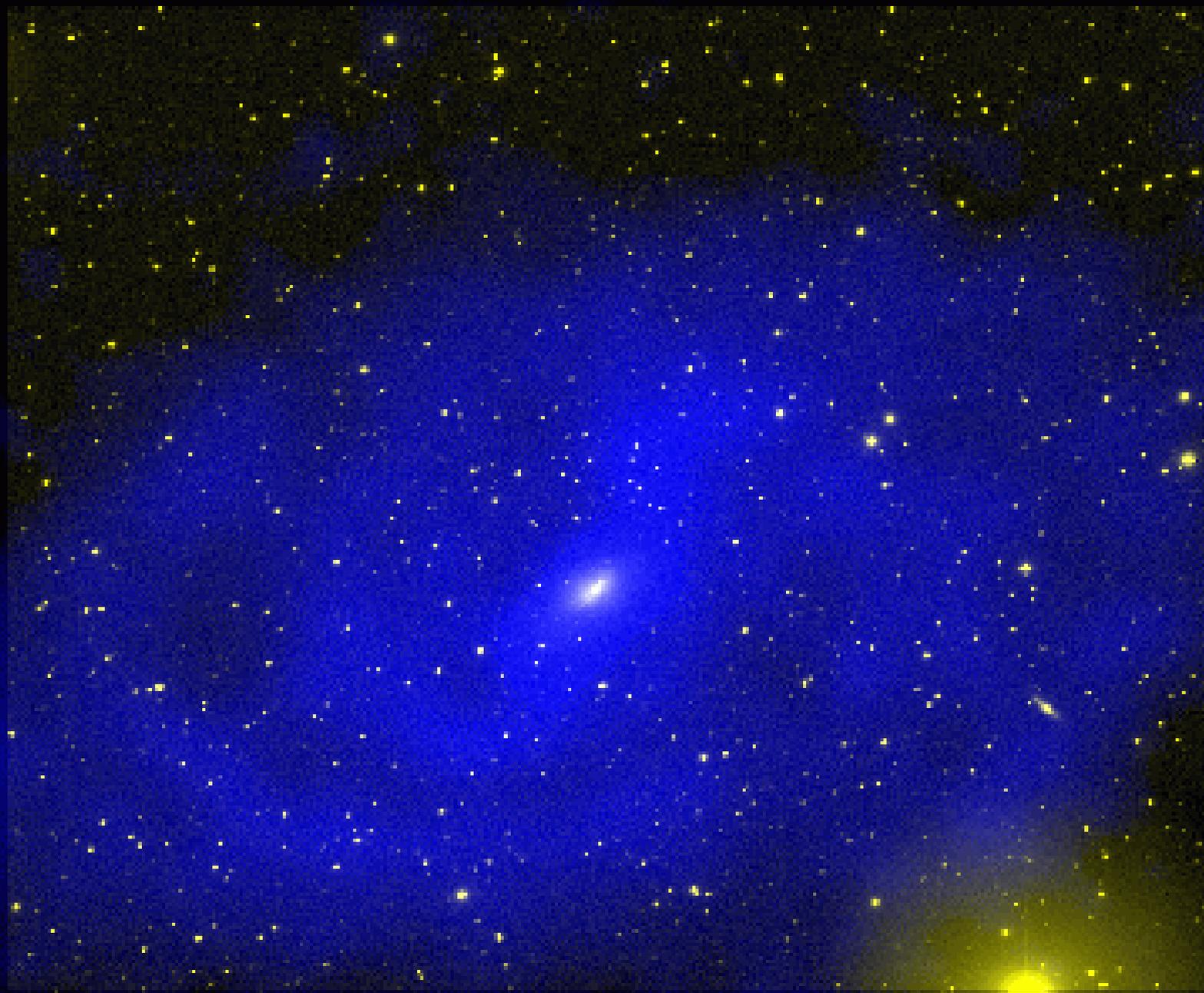
~100000 QSOs

◆ Surveys

- ◆ Con telescopios de clase 4m fue posible hacer surveys con **resolución espectral** $R=\lambda/\Delta\lambda=1000$ (300 km/s) o 5 Å a (5000 Å)
- ◆ Los surveys se concentraron en distintas transiciones por distintas especies: MgII, CIV, LLS.

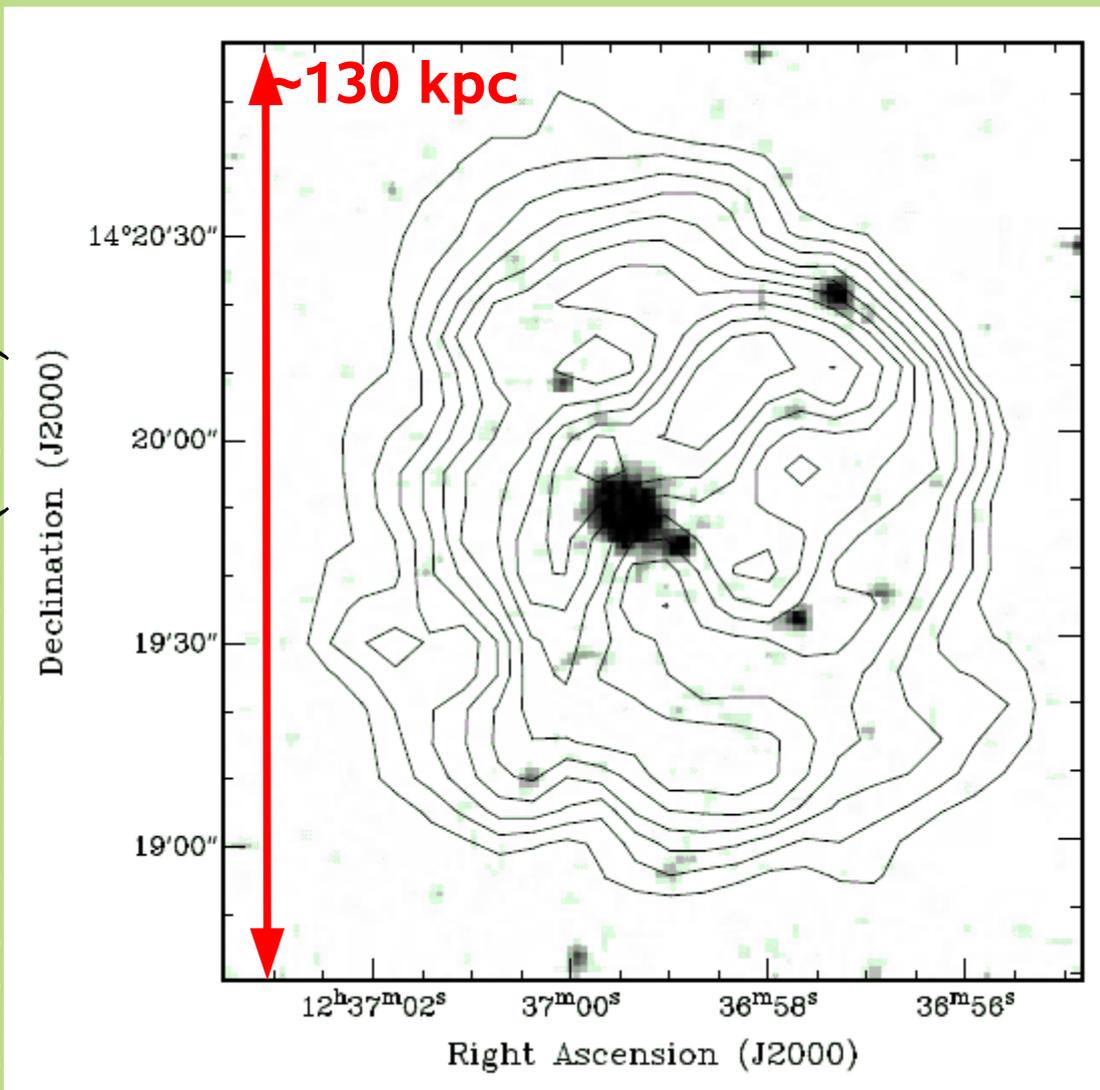
◆ Surveys

- ◆ Énfasis de los surveys fue caracterizar el número de **absorbentes por unidad de redshift dN/dz** como función de z .



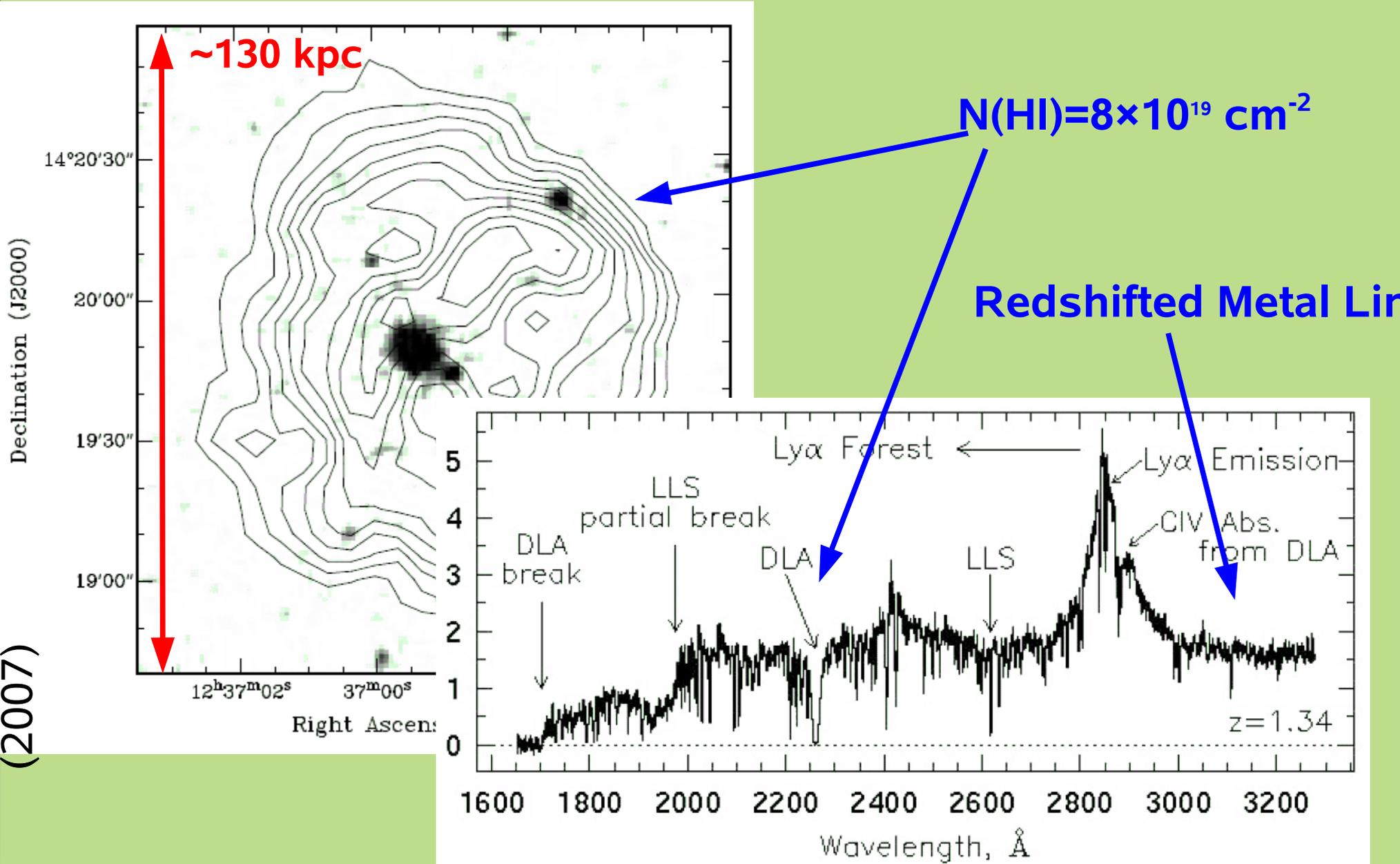
Universo local

Sancisi & Fraternali (2007)



Universo local

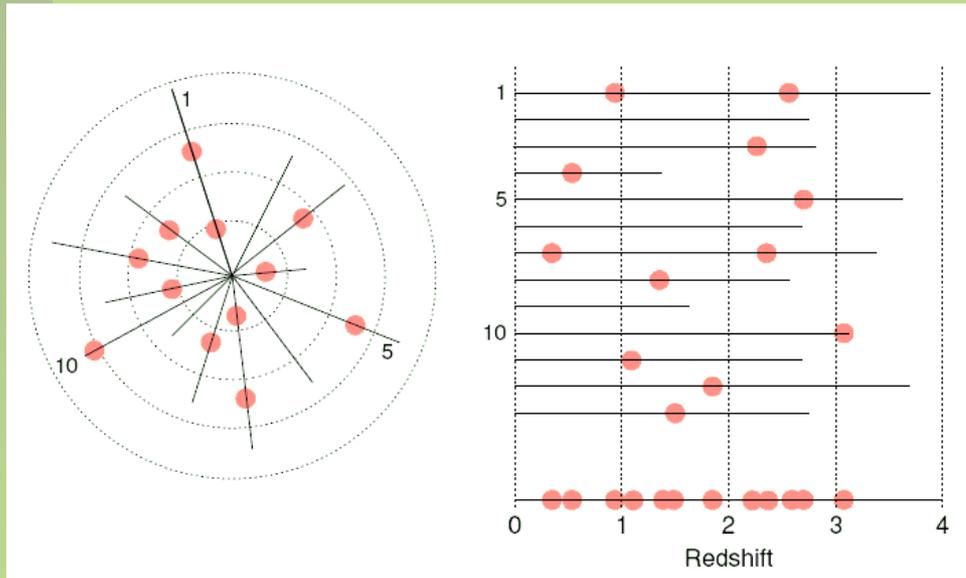
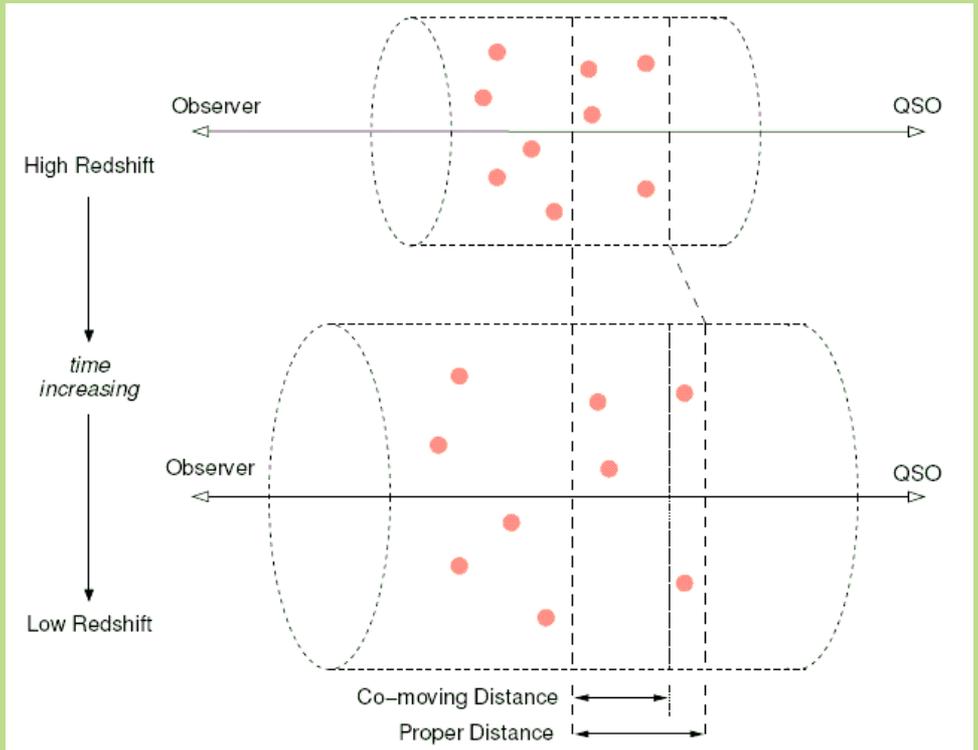
Sancisi & Fraternali
(2007)



Surveys

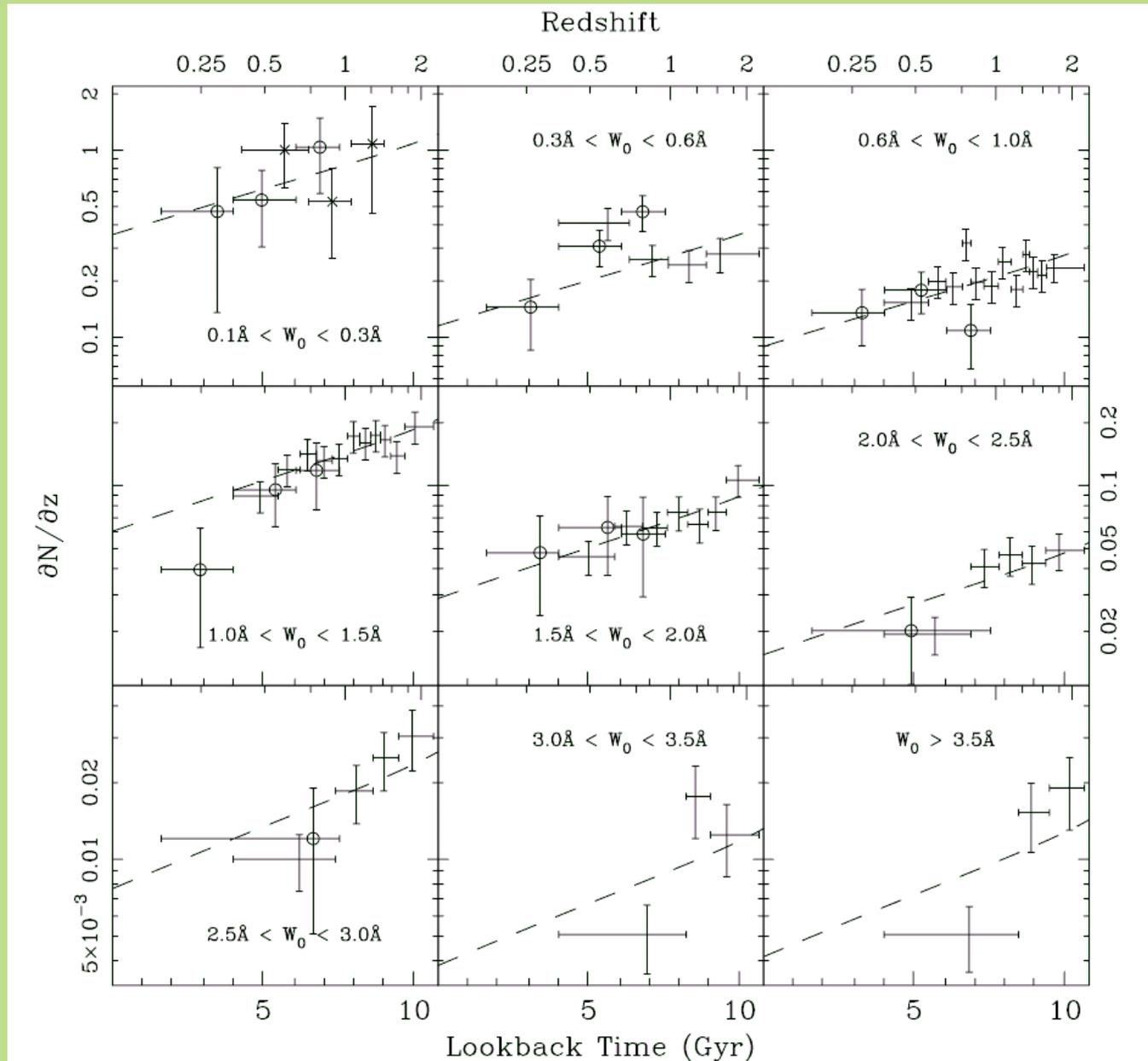
$$\frac{dN}{dz} = N(z) \frac{(1+z)^2}{\sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_\Lambda}}$$

$$N(z) = \frac{c}{H_0} n(z) \sigma(z).$$

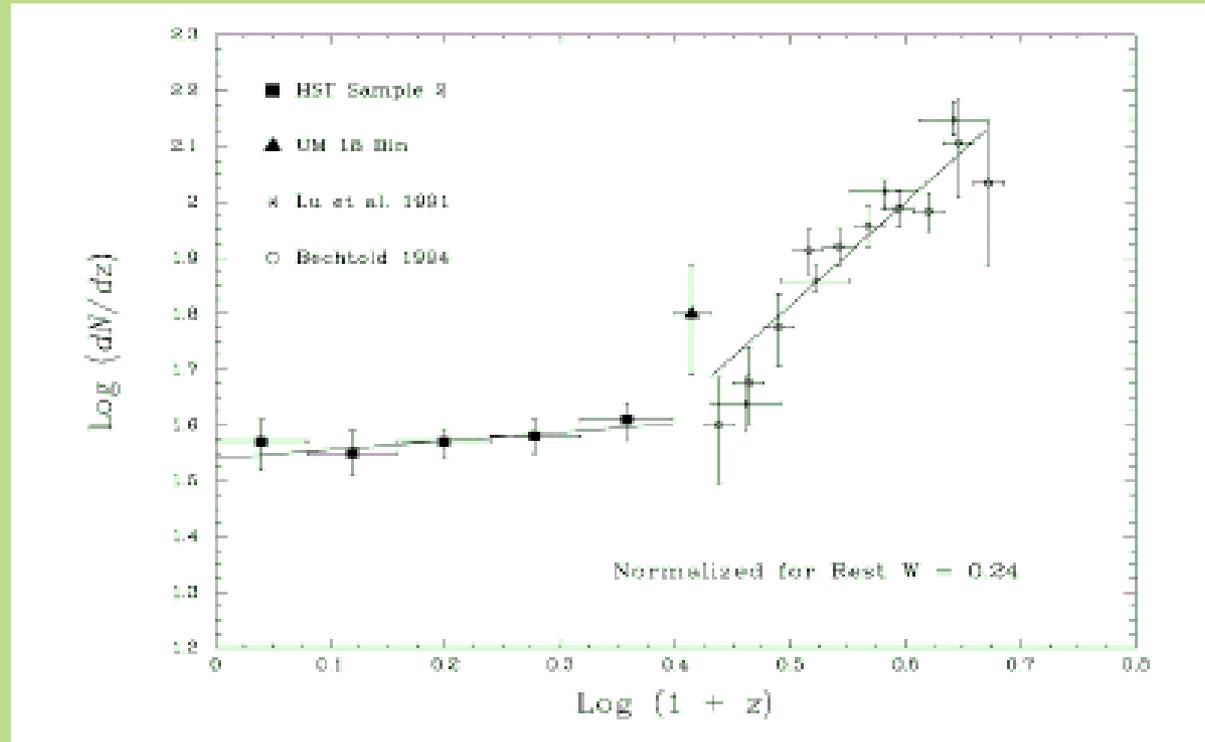


$$\mathcal{N}(\langle z \rangle) \equiv \frac{dN(\langle z \rangle)}{dz} = \frac{N_{abs}}{\Delta Z(W_{min})}$$

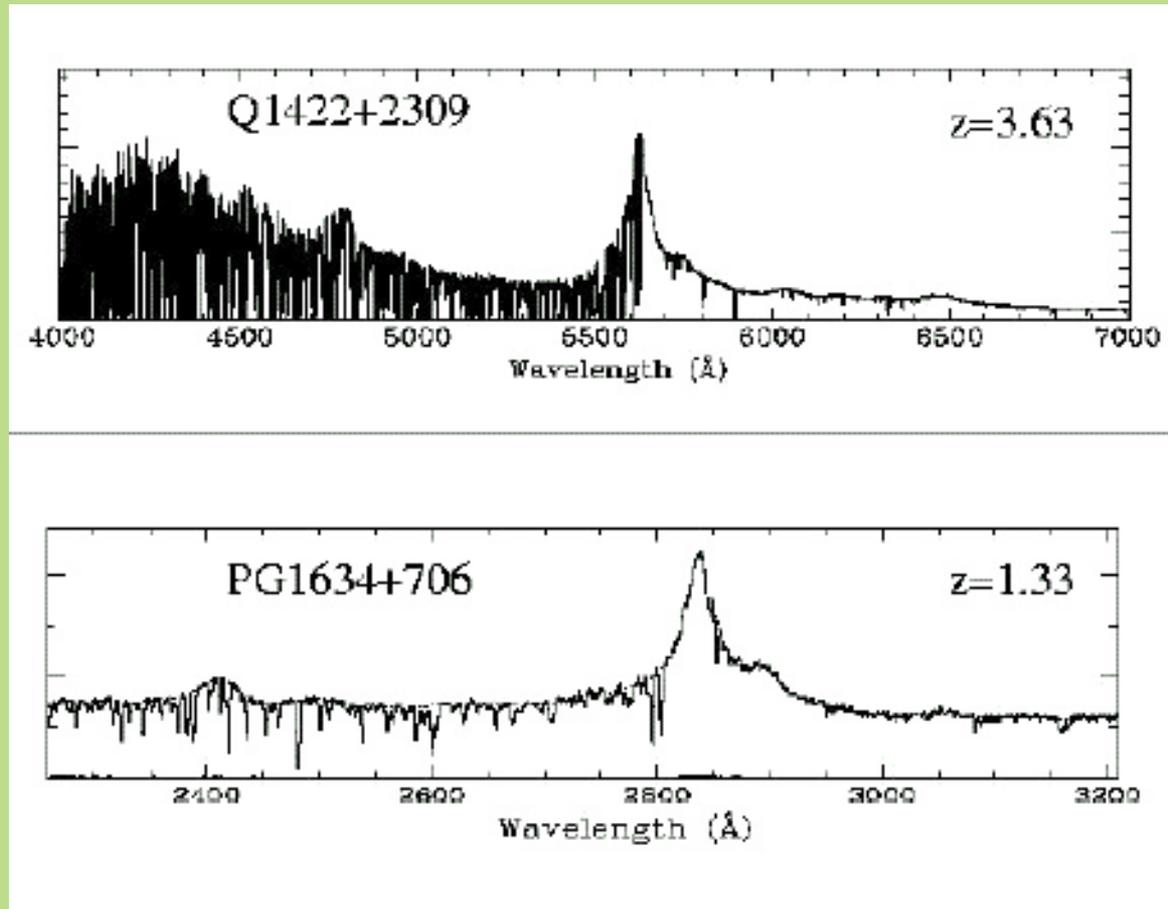
Ejemplo: dN/dz para MgII



Ejemplo: dN/dz para HI

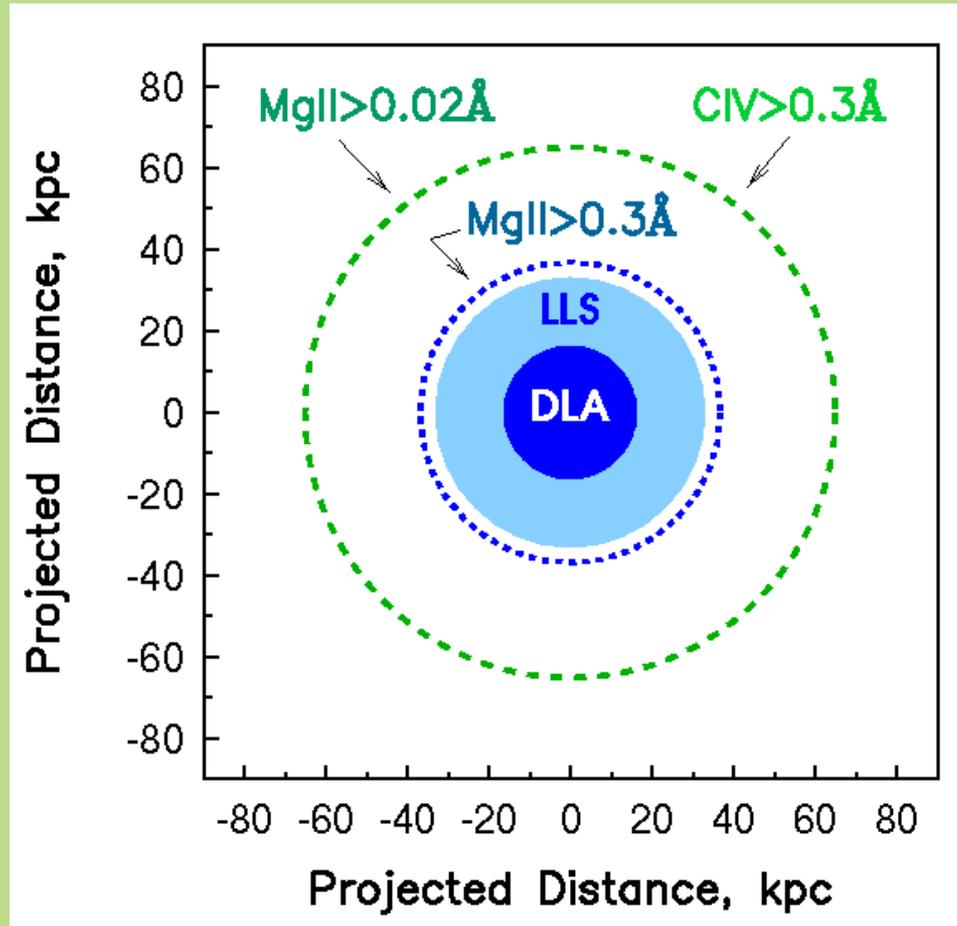


Ejemplo: dN/dz para HI



◆ Sección transversal

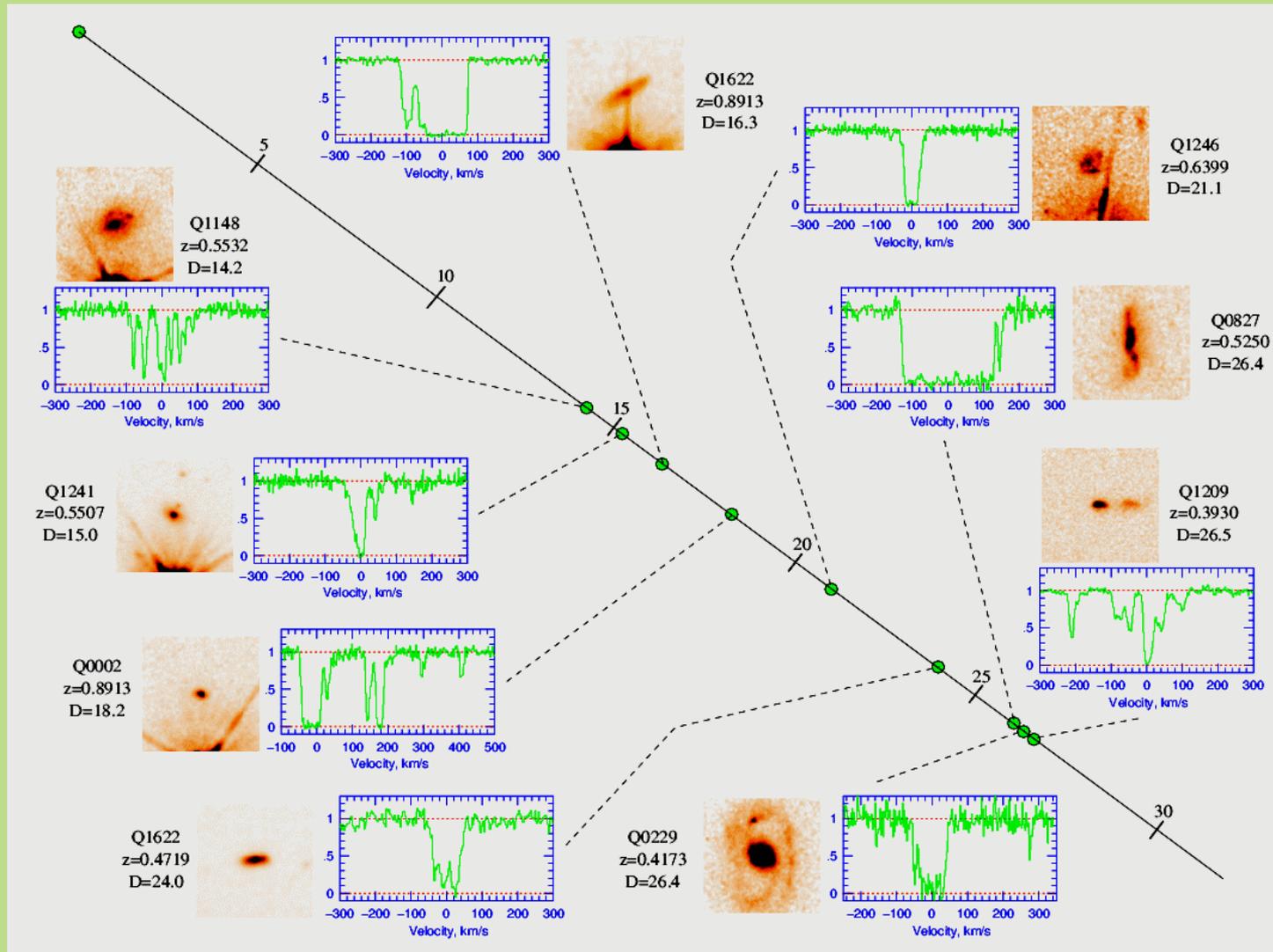
- ◆ Asumimos que la línea de visión que intercepta a una galaxia luminosa ($>0.05L^*$) a cierto radio R produce un sistema de absorción.



◆ Años 90: 4 grandes avances

- ◆ 1. Imágenes profundas en campos de QSOs con sistemas conocidos y espectroscopía de baja resolución de las galaxias permitieron la identificación de sistemas de absorción con galaxias (Bergeron et al. 1991 A&A 243, 344; Steidel et al. 1994, ApJL 437, 75)

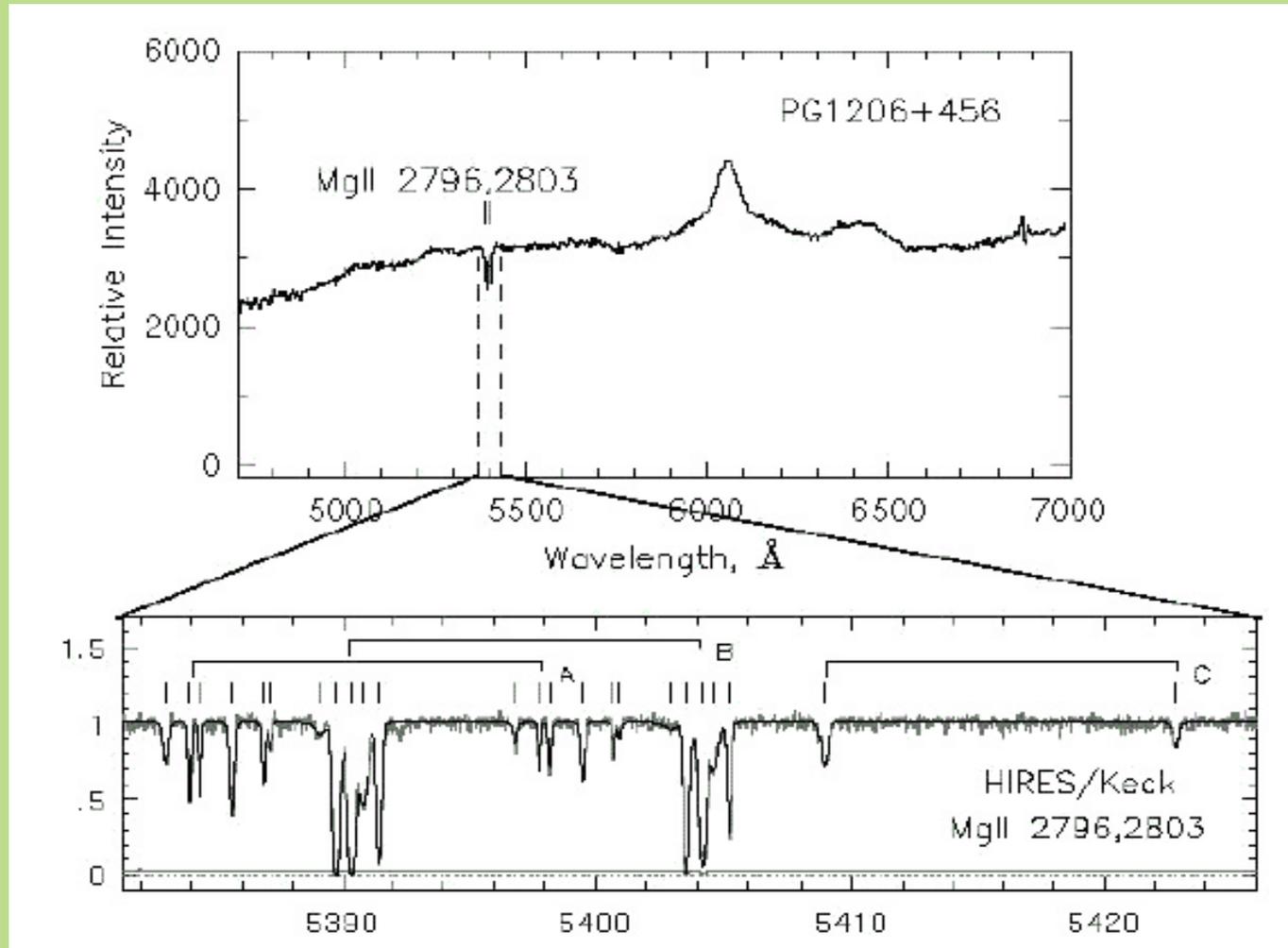
◆ Imágenes profundas (HST) en campos de QSOs con sistemas conocidos.



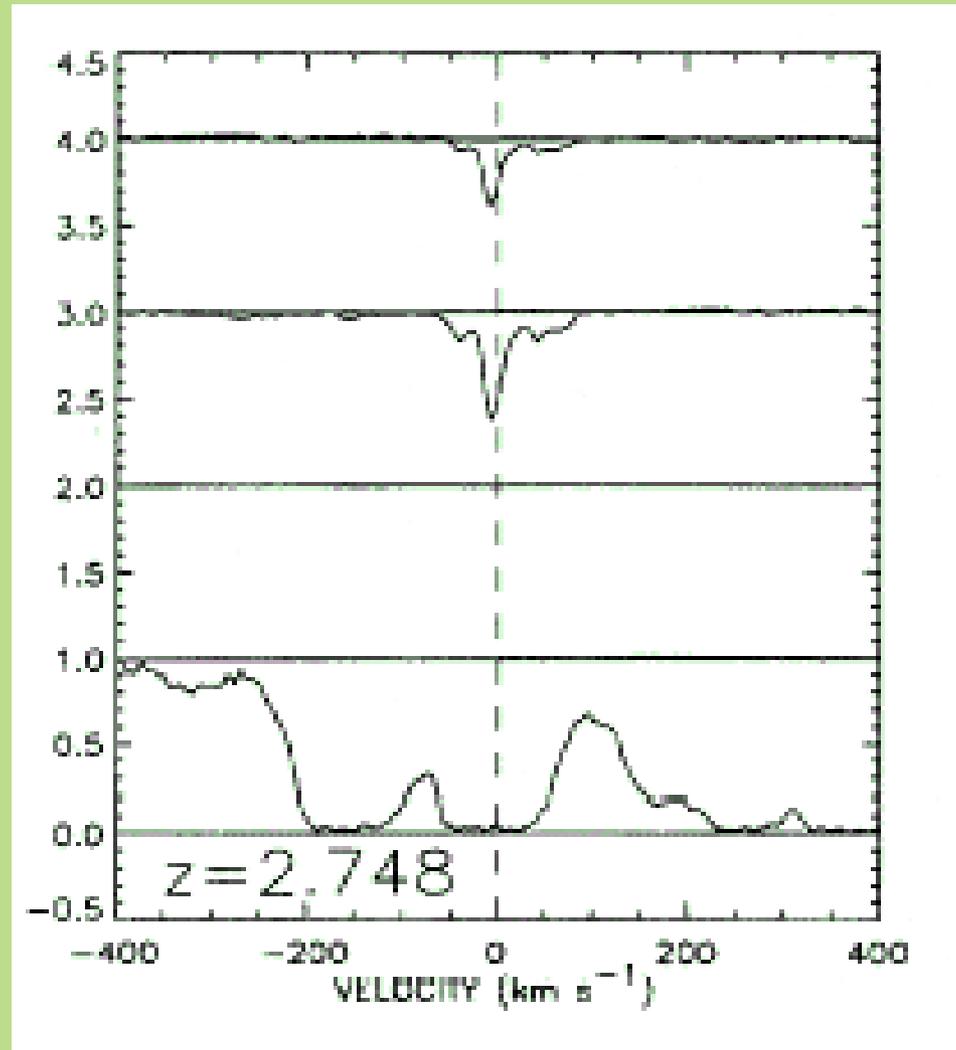
◆ Años 90: 4 grandes avances

- ◆ 2. Keck HIRES (luego VLT UVES) permitió espectroscopía a $R=45000$ (6 km/s). Se resolvió la estructura cinemática alrededor de galaxias.
 - ◆ Nubes en los halos
 - ◆ ISM de los discos
 - ◆ Metales en el Ly-alpha forest!!!

- ◆ Se resolvió la estructura cinemática alrededor de galaxias

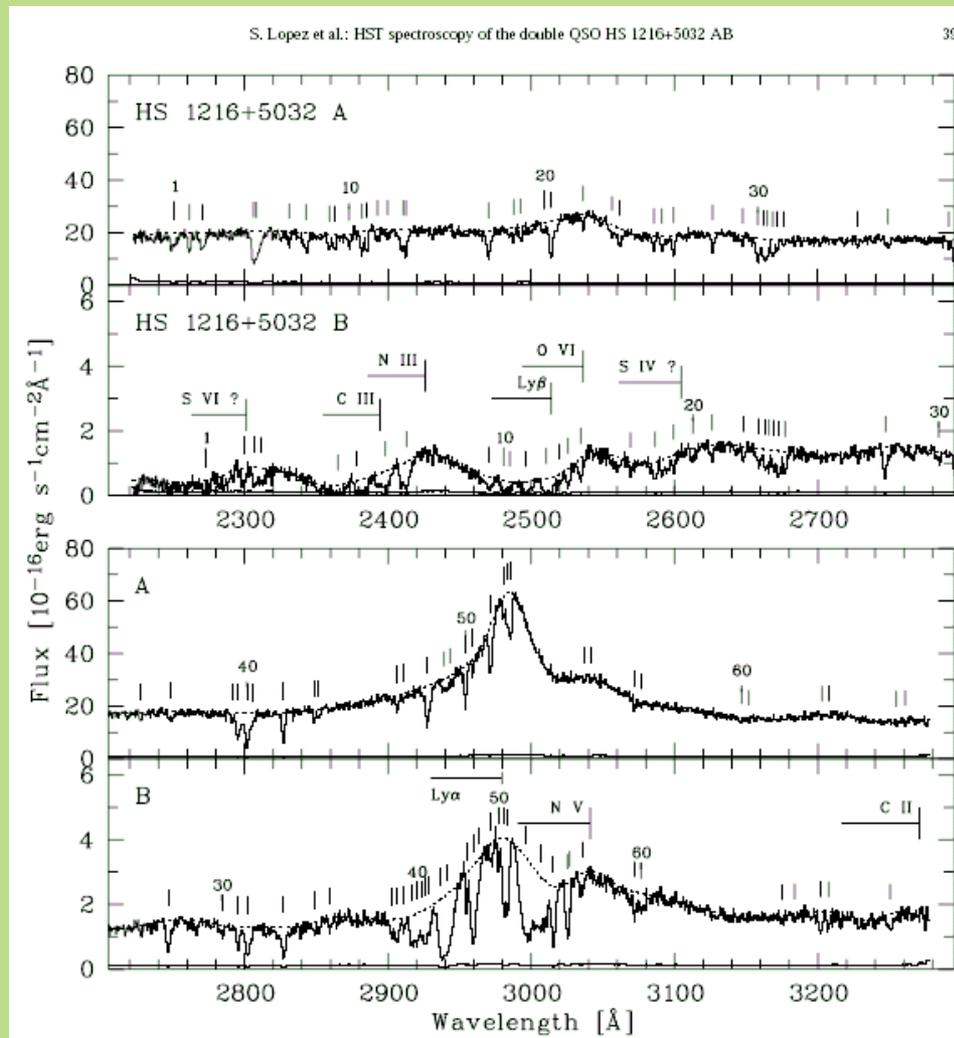


◆ Metales en la Ly-alpha forest!



◆ Años 90: 4 grandes avances

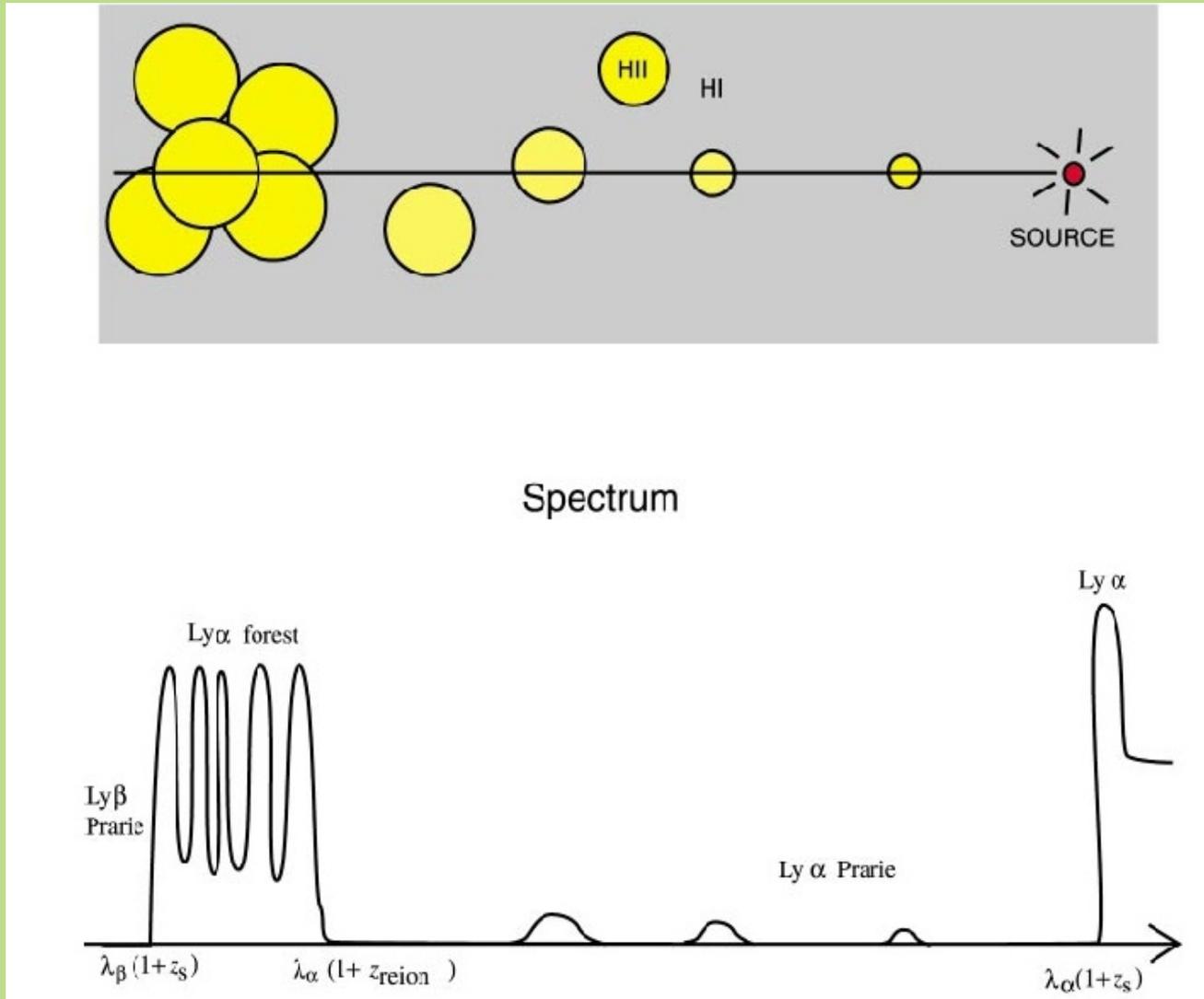
- ◆ 3. HST permitió observaciones en el UV (menor redshift) a resolución $R=1000$
- ◆ dN/dz de nubes Ly-alpha hasta $z=0$
- ◆ Condiciones de fotoionización y agente fotoionizante (normalización y forma).

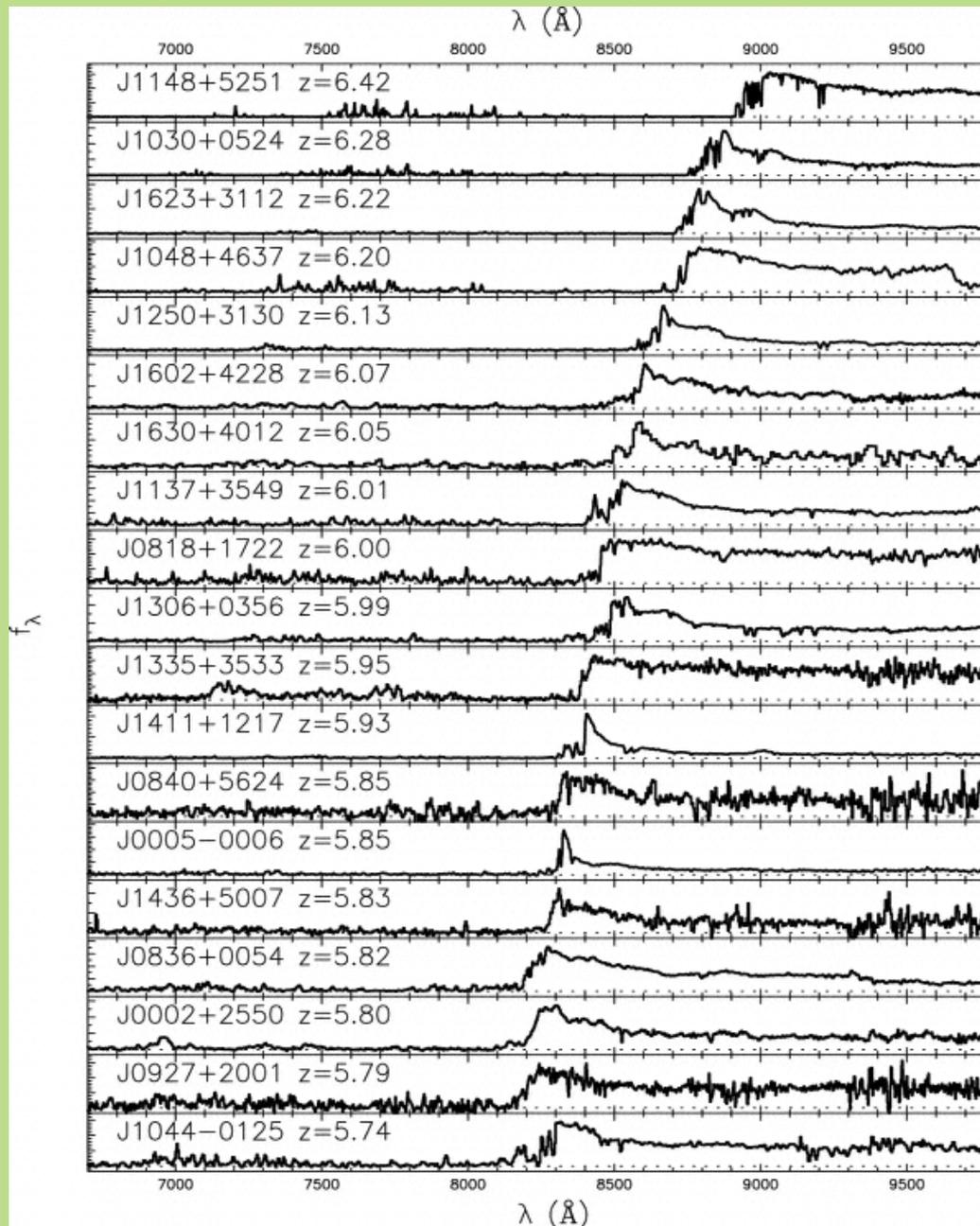


- ◆ Años 90: 4 grandes avances
 - ◆ 4. Surveys exitosos descubrieron muchos QSOs hasta $z > 6$!

◆ Presente

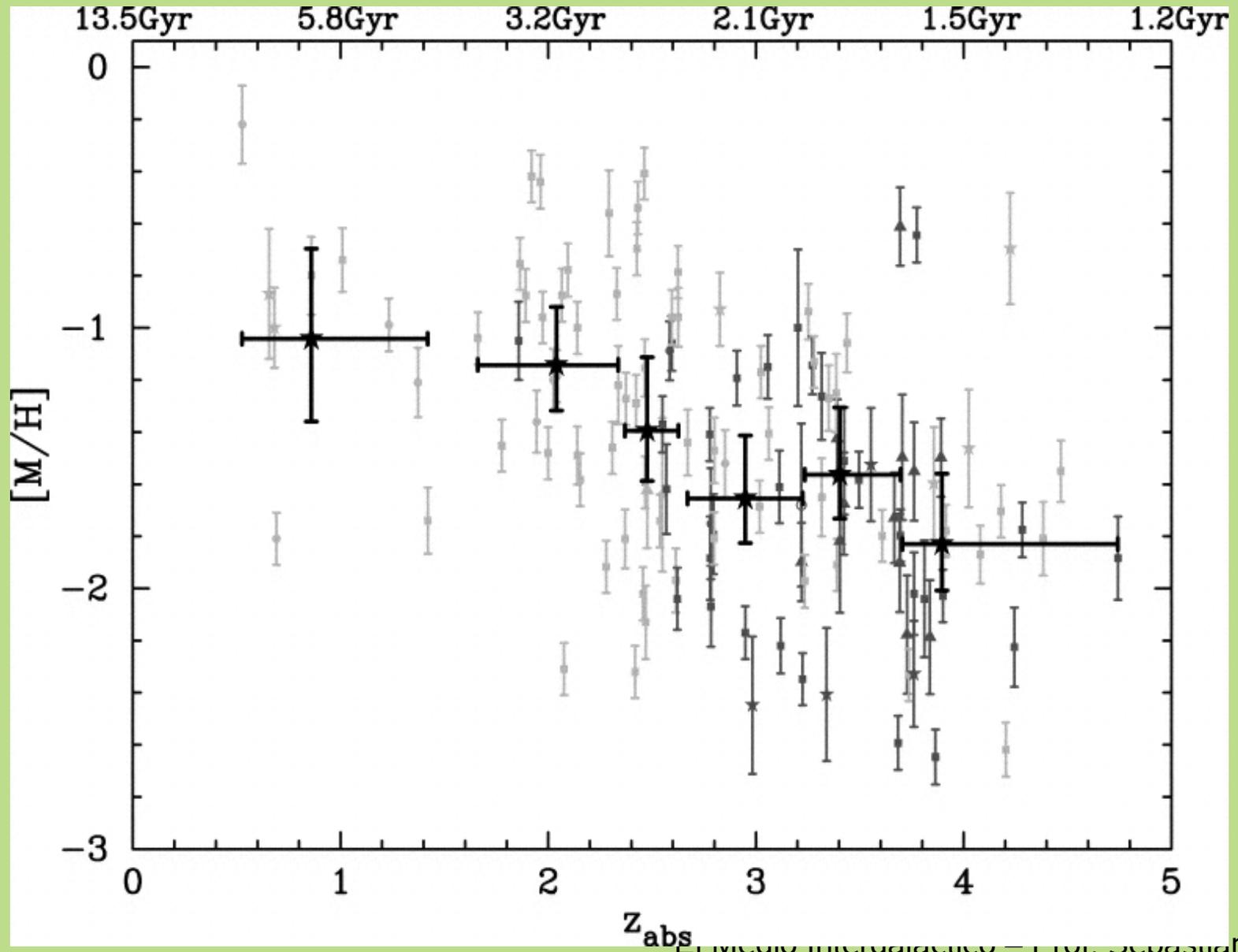
- ◆ QSO hasta redshift >6 han sido detectados (90% look-back time). Epoca de la reionizacion...





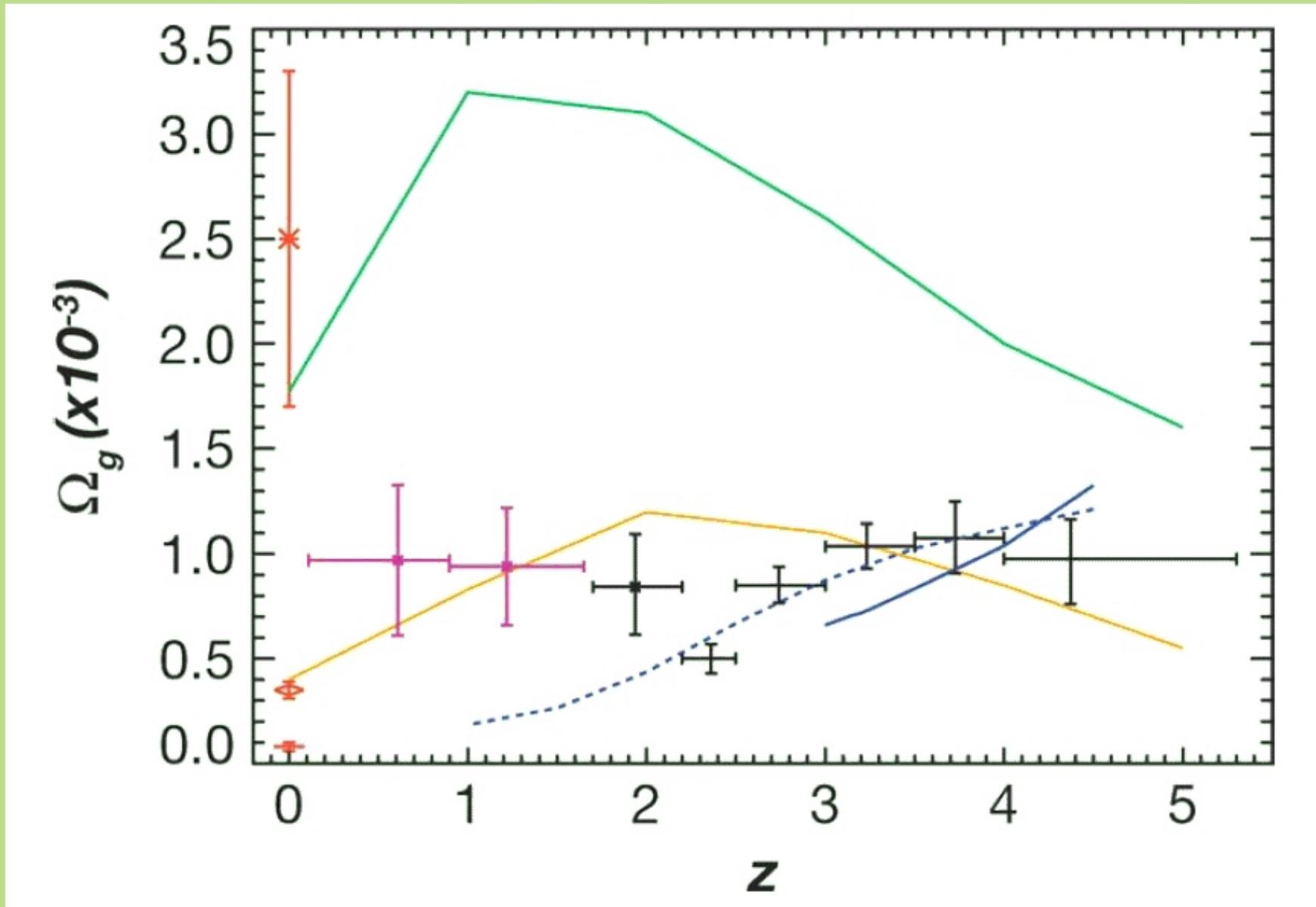
◆ Presente

- ◆ Mediciones de metalicidad del gas en DLAs.



◆ Presente

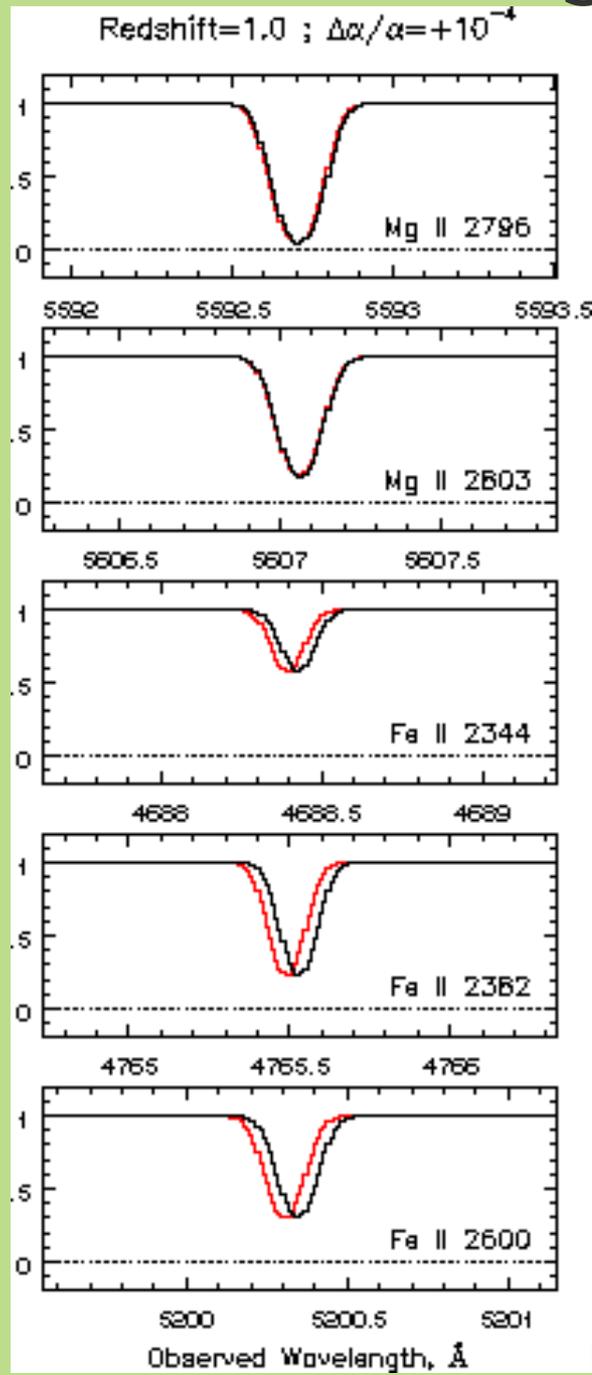
- ◆ Mediciones de la densidad cosmologica de HI



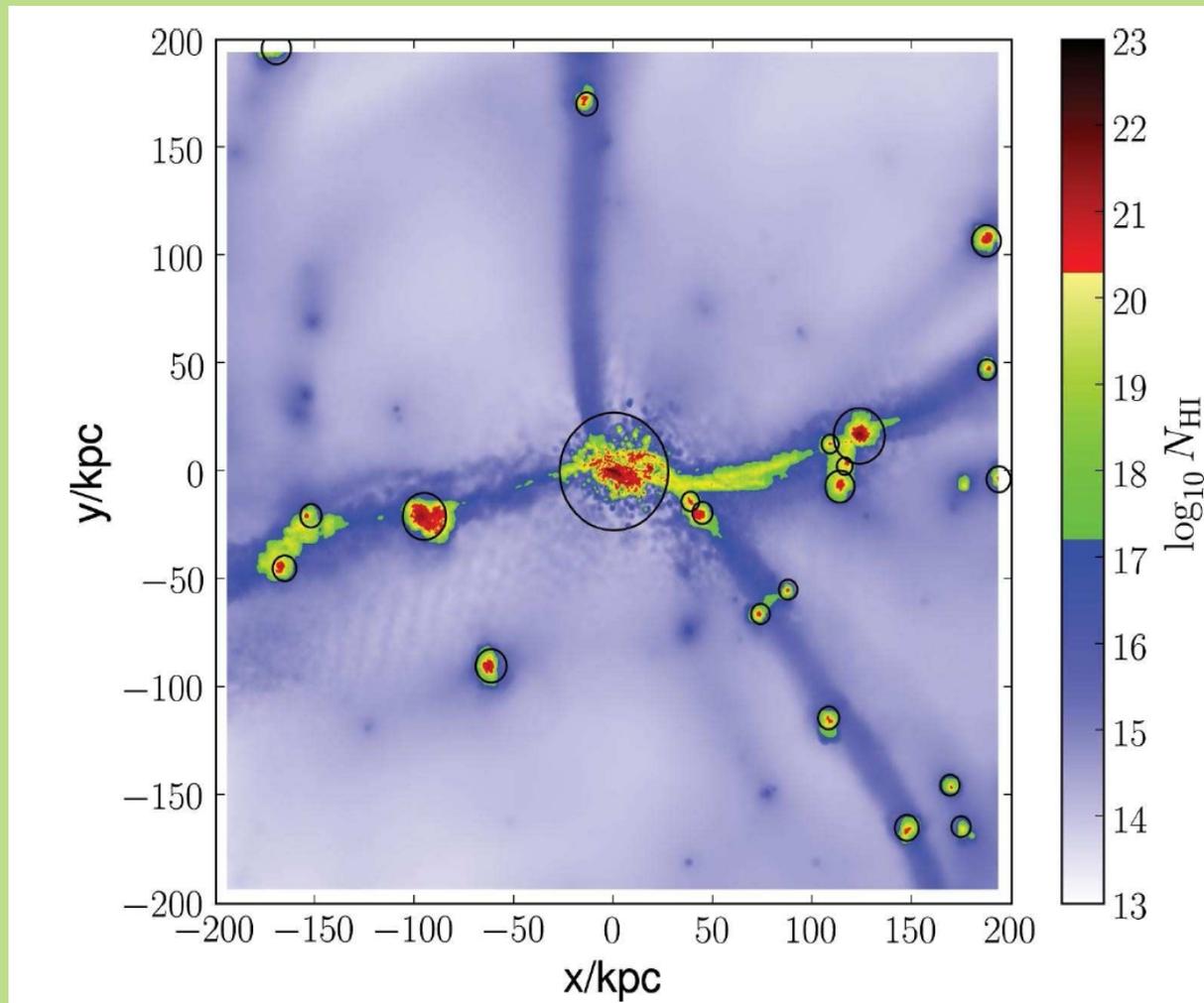
- ◆ Presente
 - ◆ Posible variación cosmológica de alpha

$$\alpha = \frac{1}{2\epsilon_0} \frac{e^2}{hc} = \frac{1}{137.03599958(52)}$$

◆ Posible variación cosmológica de alpha

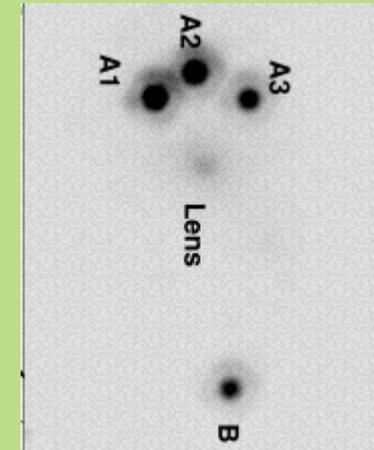
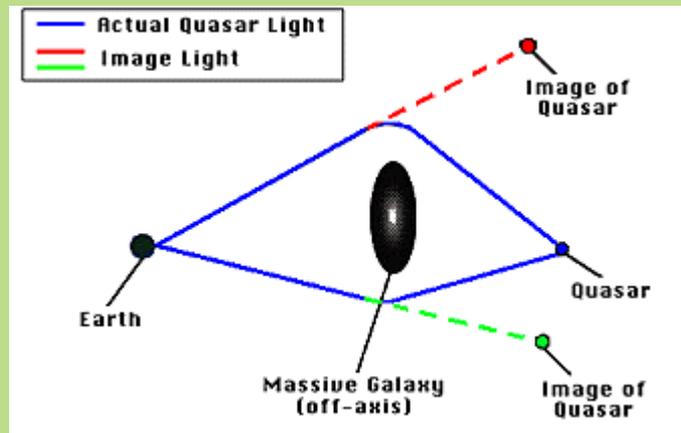
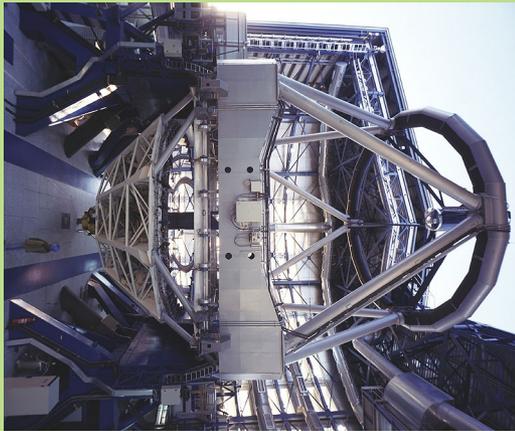


- ◆ Presente
- ◆ Simulaciones!



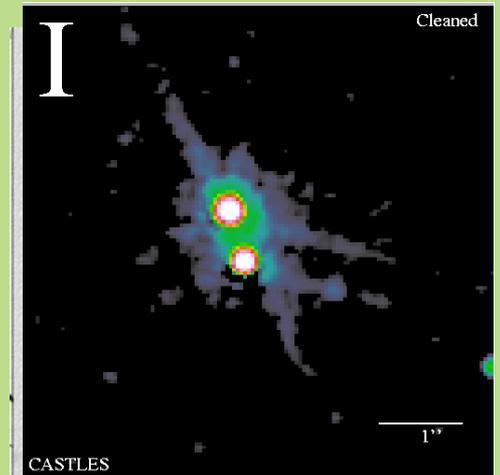
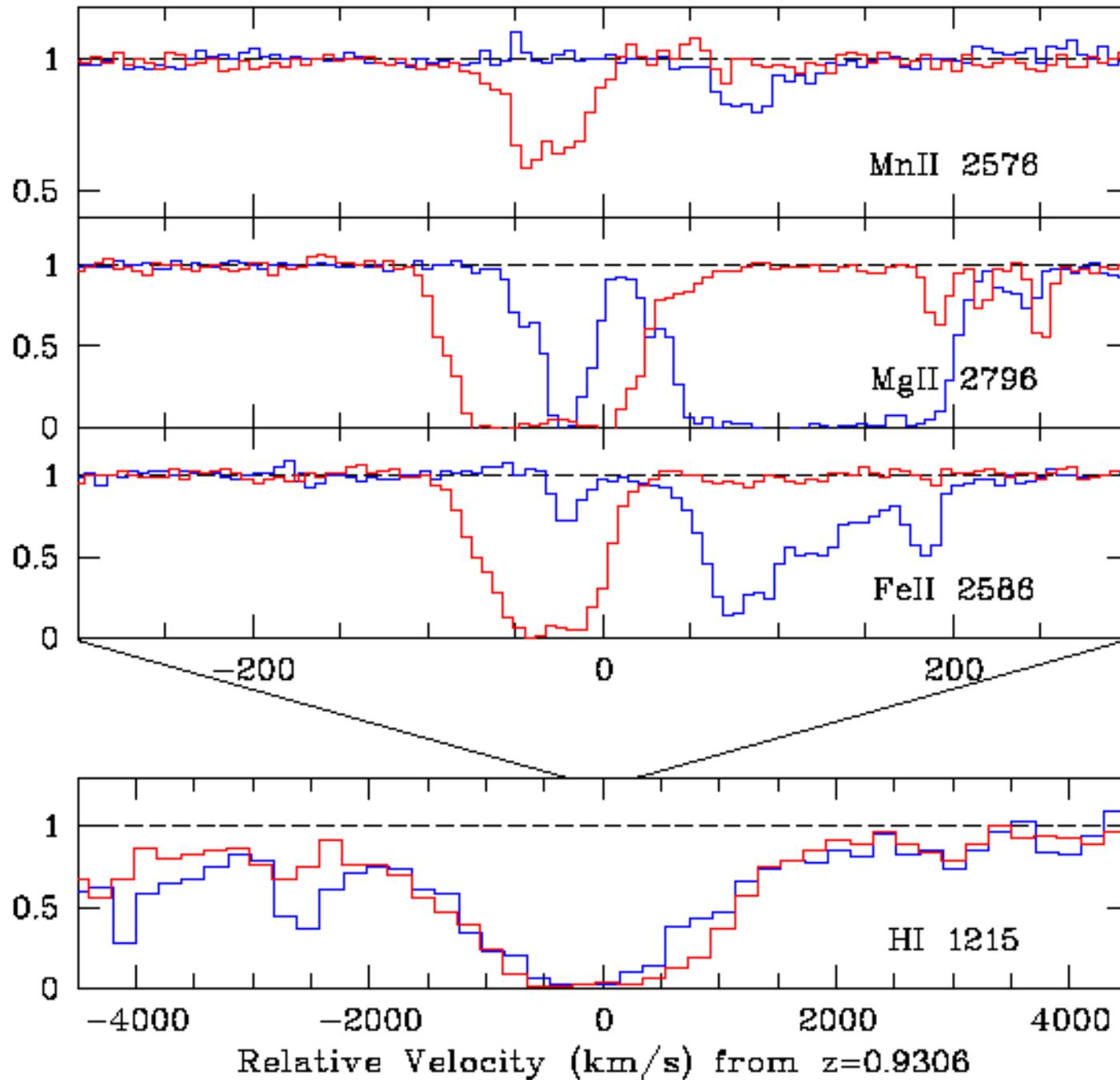
Pontzen et al. (2008)

- ◆ Presente
 - ◆ Lentes gravitacionales



HE 0512-3329 A

HE 0512-3329 B



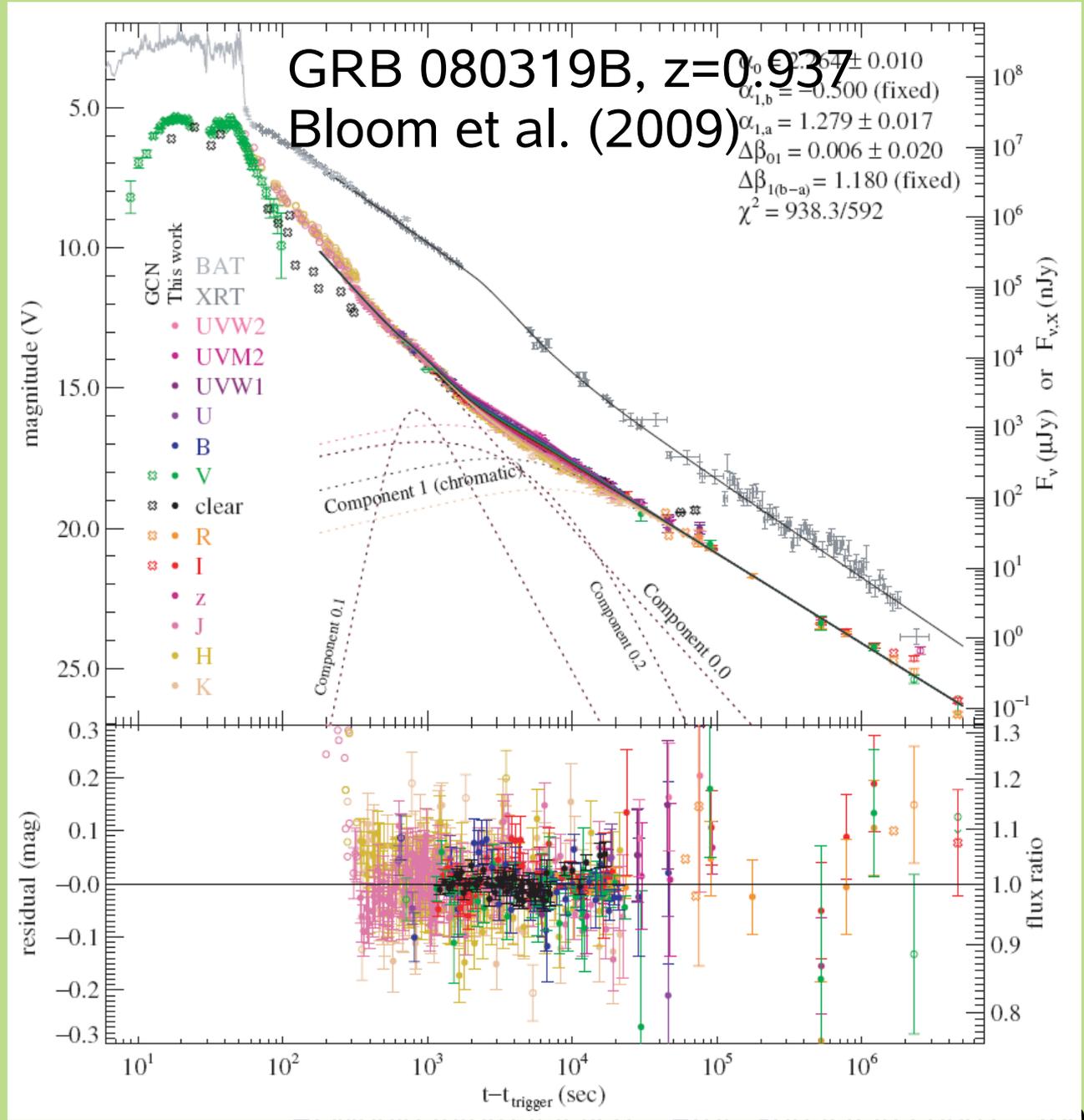
◆ Brotes de Rayos Gamma!



- Estrella masiva, NS-BH binary
- Transientes más brillantes en el Universo
- Pueden detectarse a alto *redshift*
- Se “esfuman” rápidamente
- Swift !

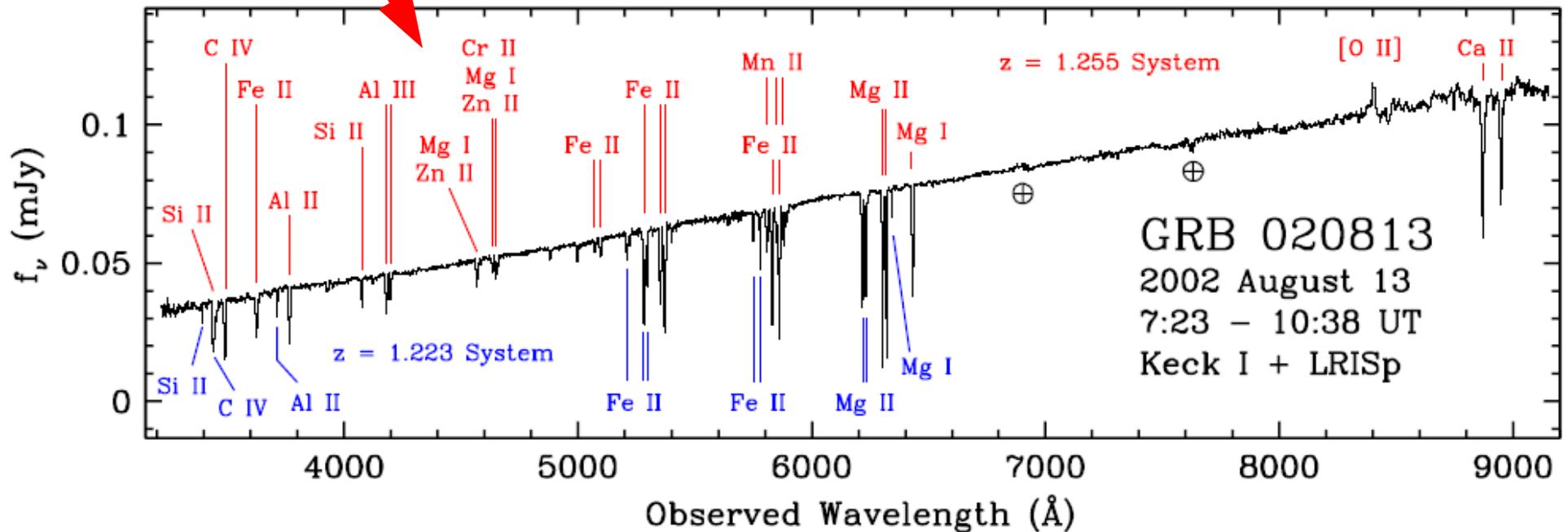
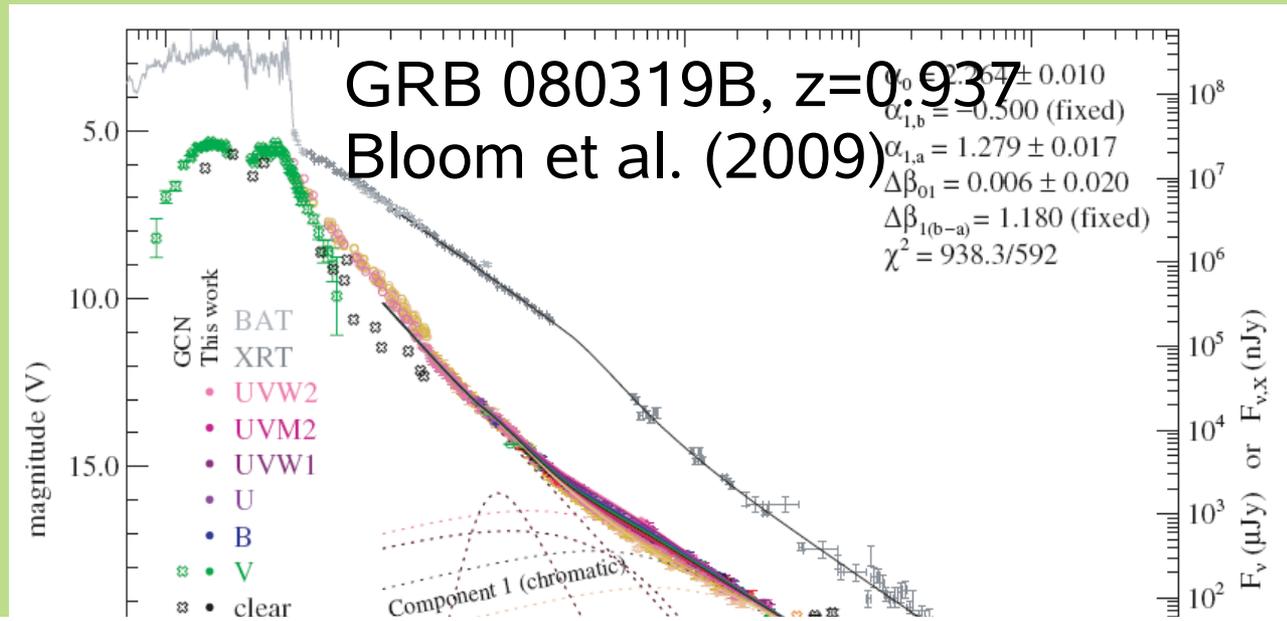
◆ *Afterglows* ópticos de Rayos Gamma!

- Magnitud visual = 5.6 !
- Aún m=19 siete horas después de la alarma...



◆ Afterglows ópticos de Rayos Gamma!

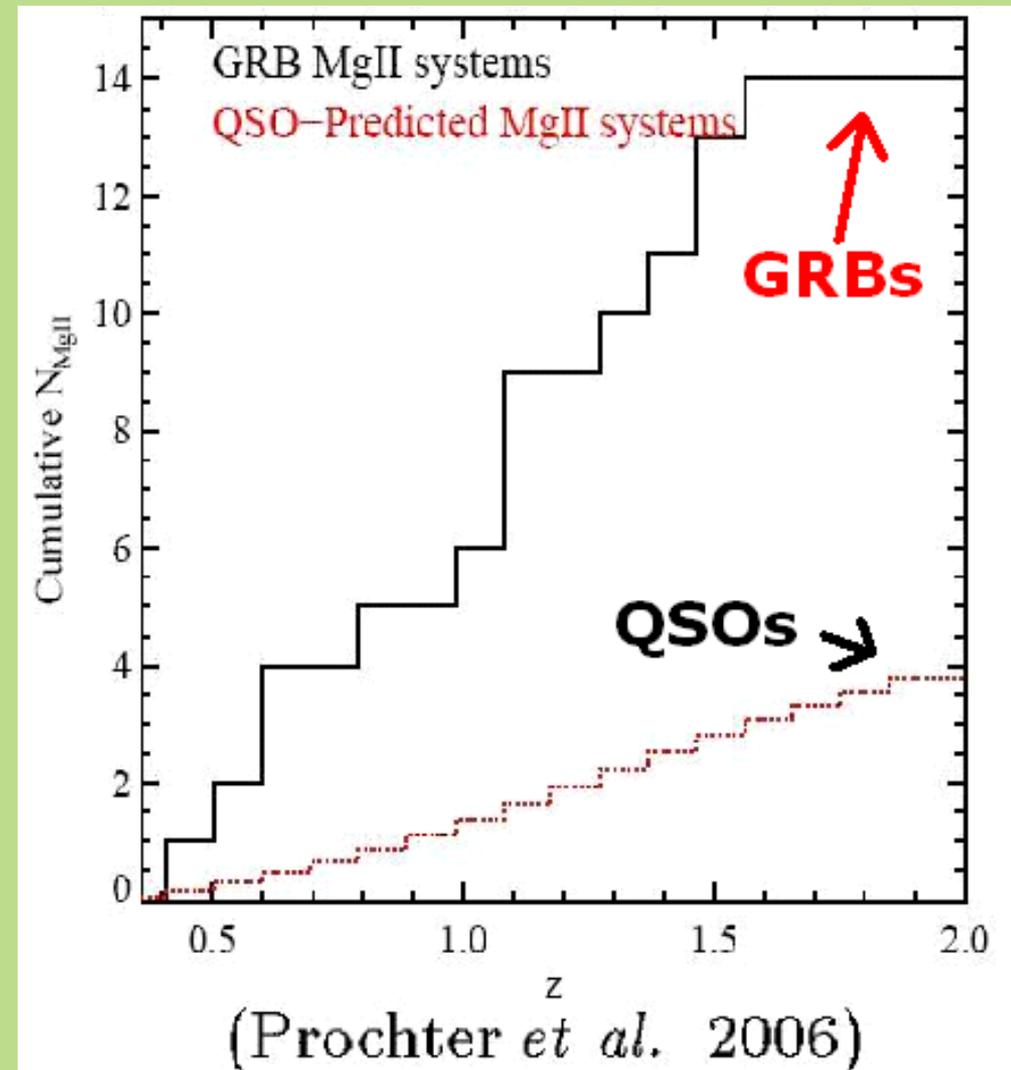
Universo en absorción



◆ *Afterglows* ópticos de Rayos Gamma!

Primer survey de absorbentes
hacia GRBs: Prochter et al. (2006)

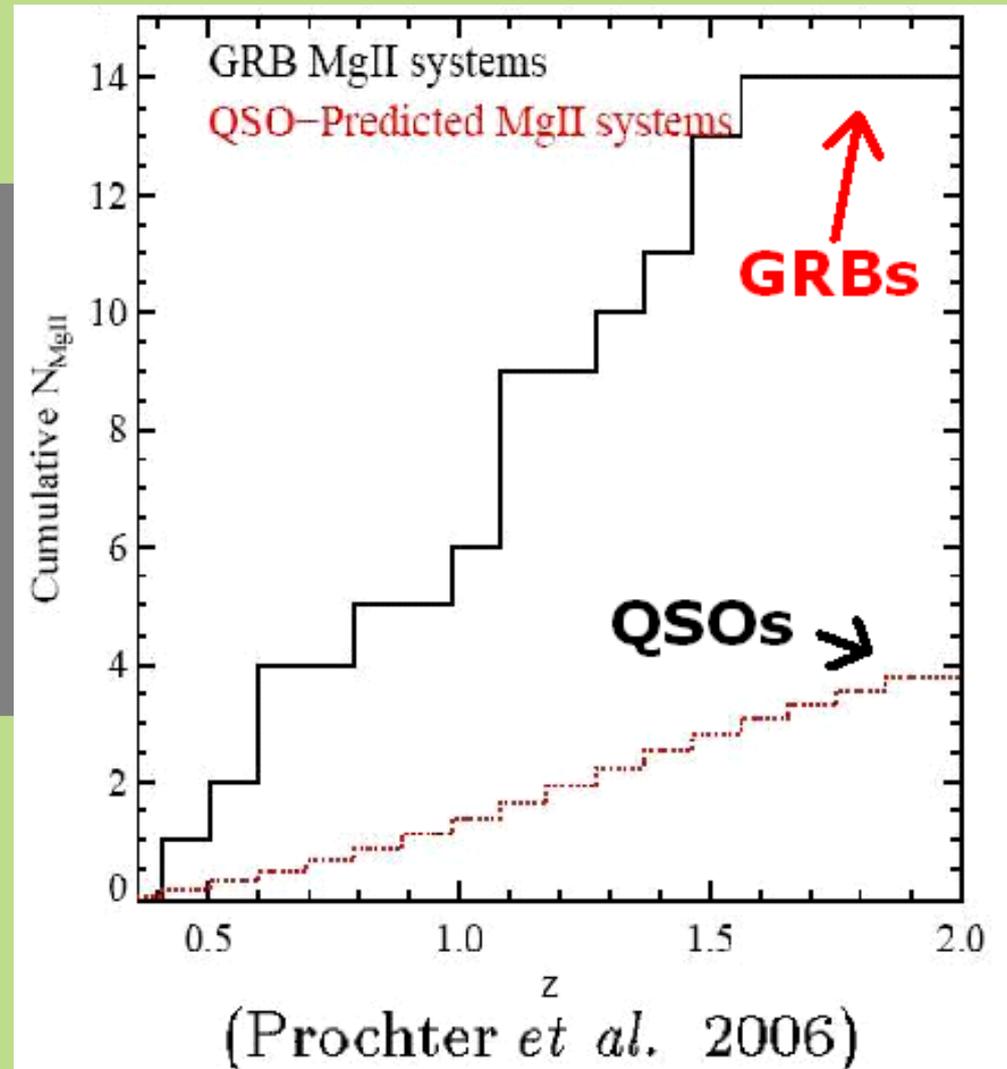
$$\left. \frac{dN}{dz} \right|_{\text{GRB}}^{\text{MgII}} \sim 4 \left. \frac{dN}{dz} \right|_{\text{QSO}}^{\text{MgII}}$$



◆ *Afterglows* ópticos de Rayos Gamma!

Primer survey de absorbentes
hacia GRBs: Prochter et al. (2006)

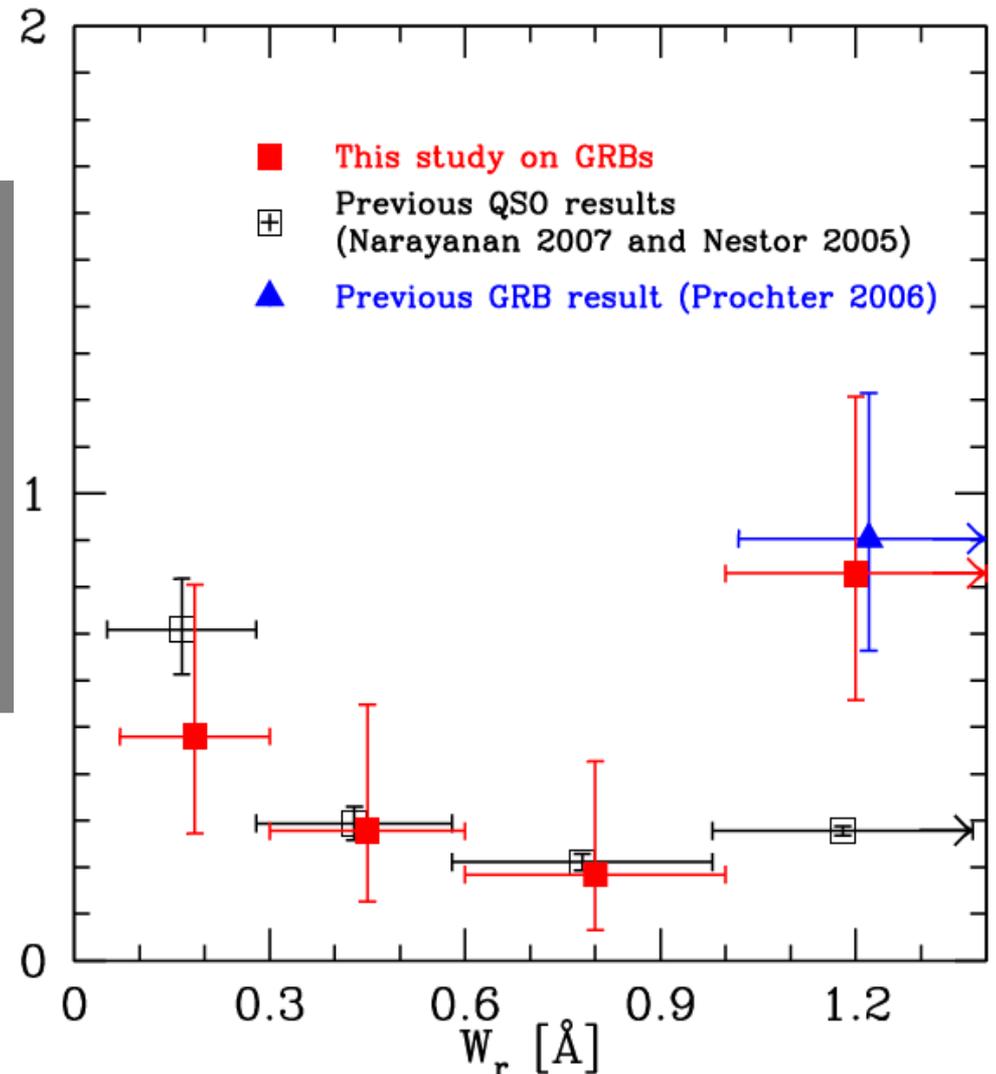
- Absorbentes intrínsecos al GRB?
- Diferentes tamaños del beam de GRBs y QSOs?
- Polvo oscurece QSOs solamente?
- Absorbentes amplifican gravitacionalmente las fuentes?



◆ *Afterglows* ópticos de Rayos Gamma!

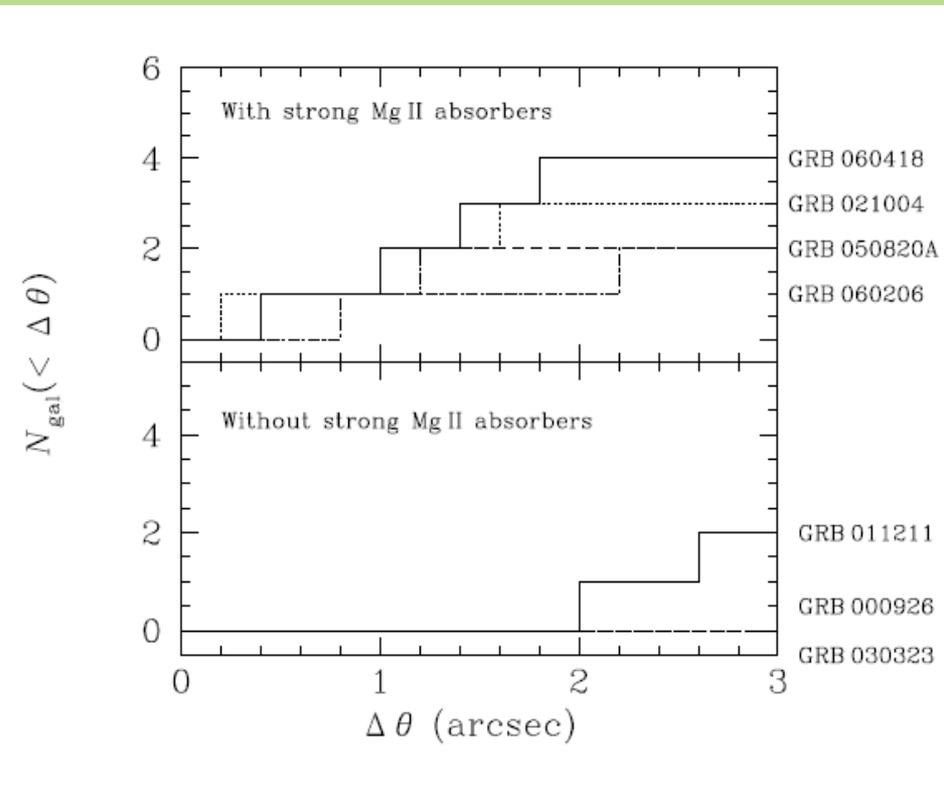
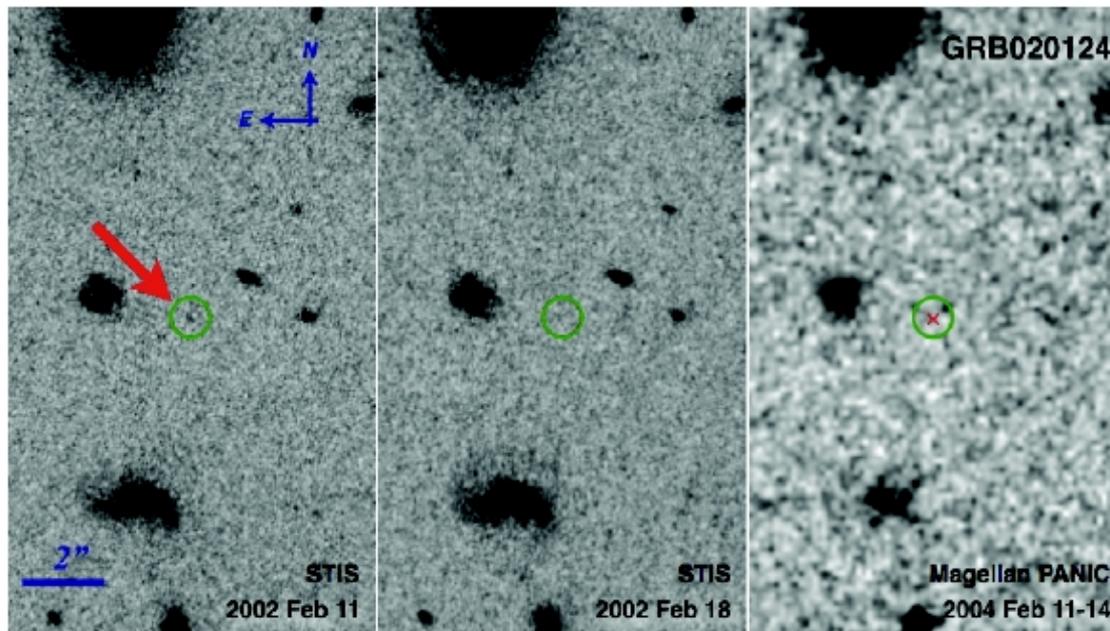
Primer survey de absorbentes hacia GRBs a alta resolución: Tejos et al. (2007, 2009)

- Absorbentes intrínsecos al GRB?
- Diferentes tamaños del beam de GRBs y QSOs?
- Polvo oscurece QSOs solamente?
- Absorbentes amplifican gravitacionalmente las fuentes?



◆ *Afterglows* ópticos de Rayos Gamma!

HST and Magellan deep nIR imaging Chen et al. (2009)



◆ Resumen

- ◆ Hoy sistemas de absorción es una herramienta muy potente para el estudio de la evolución del Universo (LSS, galaxias, formación estelar)
- ◆ Densidades bajo densidad crítica son detectadas
- ◆ El número de absorbentes es independiente de las propiedades del QSO.
- ◆ Resolución espectral alta permite resolver anchos de las líneas (Temperatura)
- ◆ QSO hasta redshift >6 han sido detectados (90% look-back time)
- ◆ GRB Afterglows prometen grandes avances.

◆ Resumen.

- ◆ Técnica de GRB/QAL nos permite obtener:
 - ◆ Abundancias químicas en ISM a alto redshift
 - ◆ Estado de ionización de los absorbentes
 - ◆ Tomografía del IGM
 - ◆ Reloj de constantes fundamentales.
 - ◆ Cota edad de cuasares