

Unidad IV.

Reionización

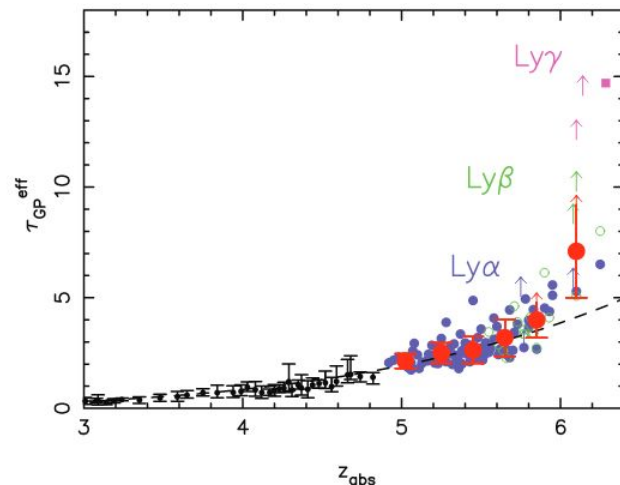
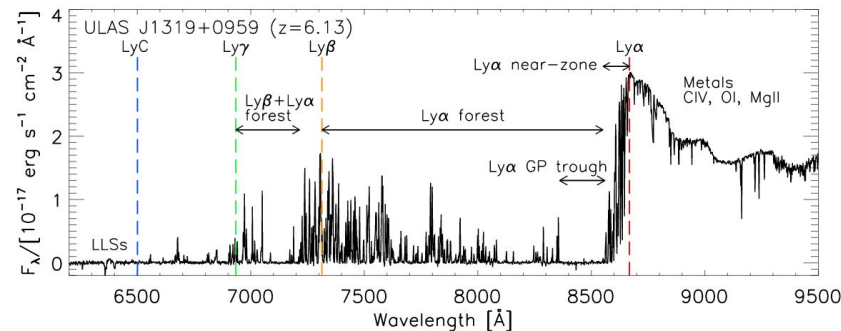
Parte 2: Observaciones en 21 cm

Recordatorio...

Fuentes de reionización

El HI absorbe la emisión de Ly α eficientemente, de manera que la ausencia de emisión de Ly α entre una fuente de emisión UV (como un quásar) y nosotros nos permite trazar la prevalencia de HI en la línea de visión, usando el bosque de Ly α para estudiar el IGM y el efecto Gunn-Peterson para medir las últimas etapas de reionización.

Sin embargo, las etapas tempranas de reionización, o la era pre-reionización, están ocultas a observaciones de Ly α . Esto se ve en el gráfico de la derecha, donde tanto la dispersión como la incerteza en mediciones de la profundidad óptica del efecto Gunn-Peterson aumenta rápidamente al adentrarse en la época de reionización.

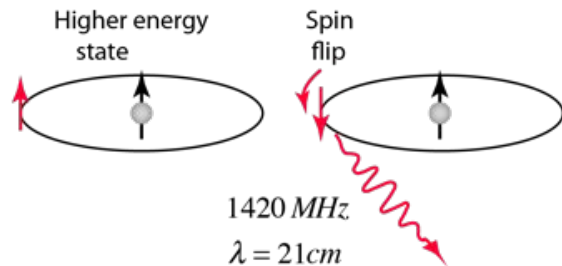


Sigamos!

La abundancia de HI con observaciones en 21 cm

Como ya dijimos, basta una pequeña fracción de HI para absorber prácticamente la totalidad de fotones Ly α , por lo que esta técnica sólo permite establecer límites inferiores al contenido de HI, y estudiar en detalle sólo la fase final de reionización. Además, la incerteza en la fracción de escape de fotones Ly α y otros parámetros físicos limitan la posibilidad de generalizar resultados a partir de unas pocas galaxias.

La transición hiperfina de hidrógeno, en la que se libera un fotón con $\lambda = 21$ cm ($\nu = 1.42$ GHz) ofrece un observable alternativo y potencialmente más poderoso para determinar las características del proceso de reionización del Universo, pero recién ahora están empezando a habilitarse experimentos con suficiente sensibilidad para permitir observaciones de la época de reionización.



La línea de 21 cm se ha usado por muchos años para estudiar el contenido de HI de galaxias cercanas y la Vía Láctea, luego de las primeras mediciones en el disco de la Vía Láctea en 1951 (Ewan & Purcell 1951, Muller & Oort 1951).

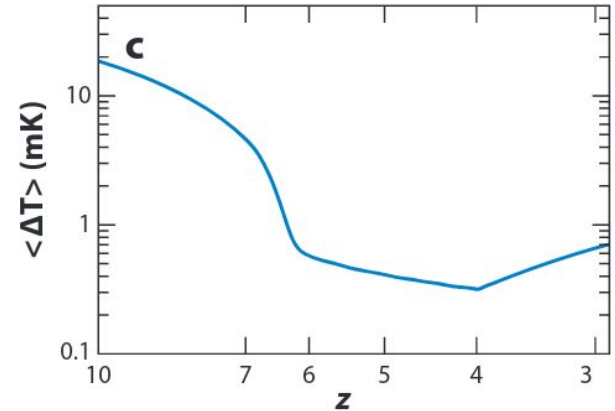
La intensidad de la línea de 21 cm se mide a partir de la diferencia de temperatura

$$\Delta T = \frac{T_S - T_{\text{CMB}}(z)}{1+z} (1 - e^{-\tau_\nu})$$

donde T_{CMB} es la temperatura del fondo cósmico, T_S es la temperatura de spin de HI, y τ_ν es la profundidad óptica de HI,

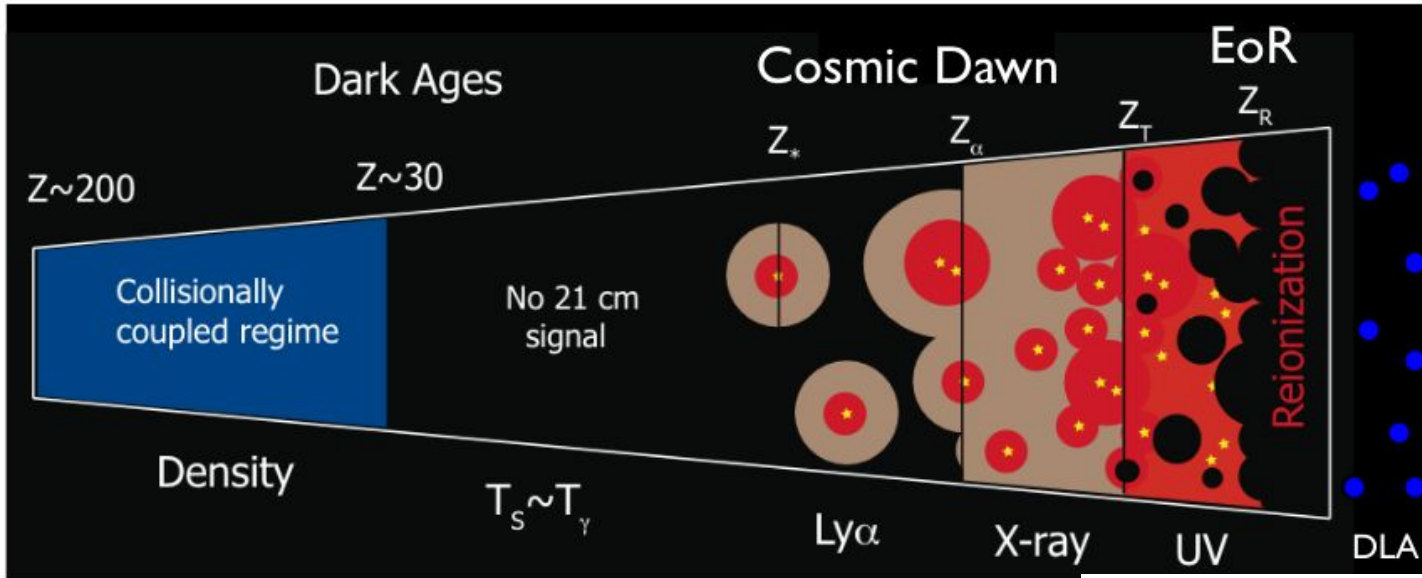
$$\tau_\nu = \frac{3}{32\pi} \frac{hc^3 A_{10}}{k_B T_S \nu^2} \frac{\bar{x}_{\text{HI}} n_{\text{H}}}{(1+z)(dv_{\parallel}/dr_{\parallel})}$$

con A_{10} el coeficiente de emisión espontánea, x_{HI} la fracción de HI, n_{H} es la densidad de columna de hidrógeno, y $dv_{\parallel}/dr_{\parallel}$ el gradiente de velocidad en la línea de visión, (El último denominador incorpora fluctuaciones introducidas por velocidades en la línea de visión.)

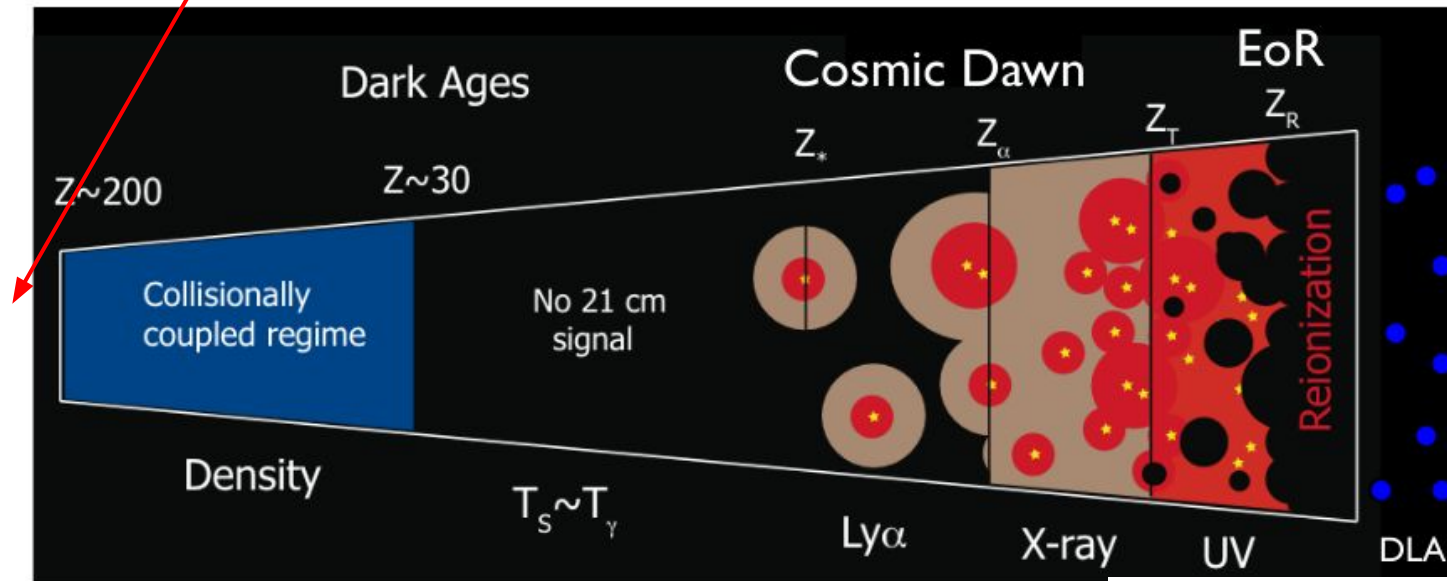


Morales & Wyithe (2010)

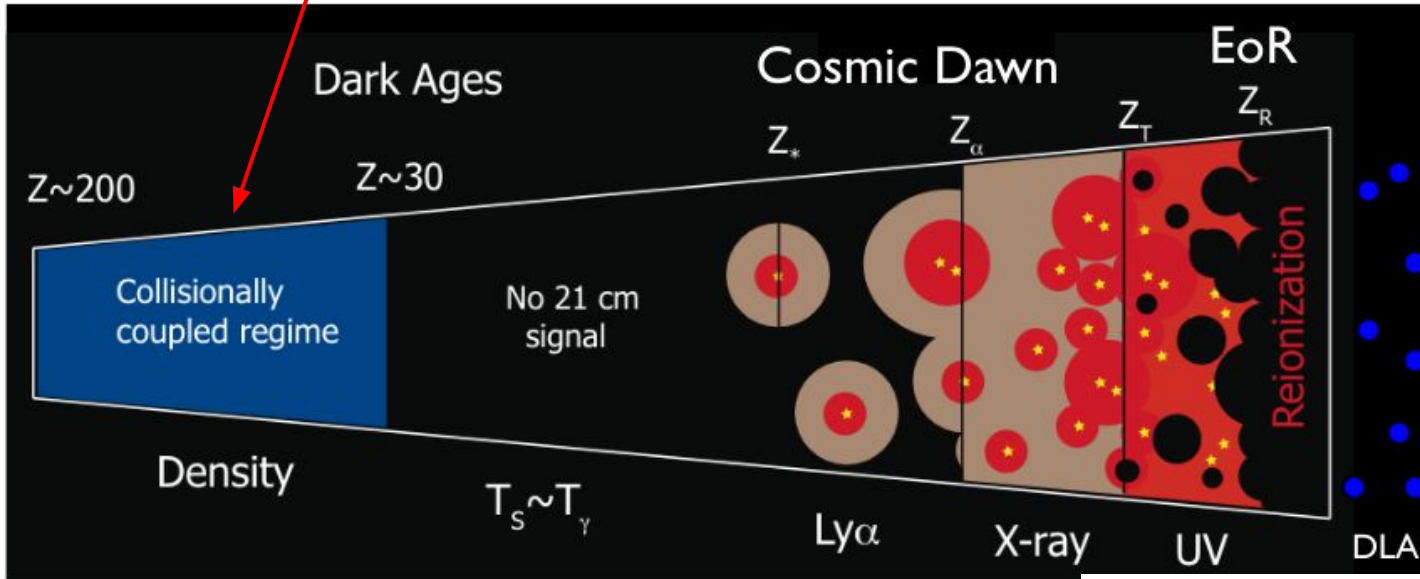
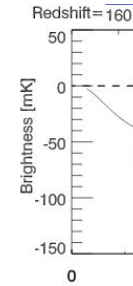
Trazando la historia del Universo con 21 cm



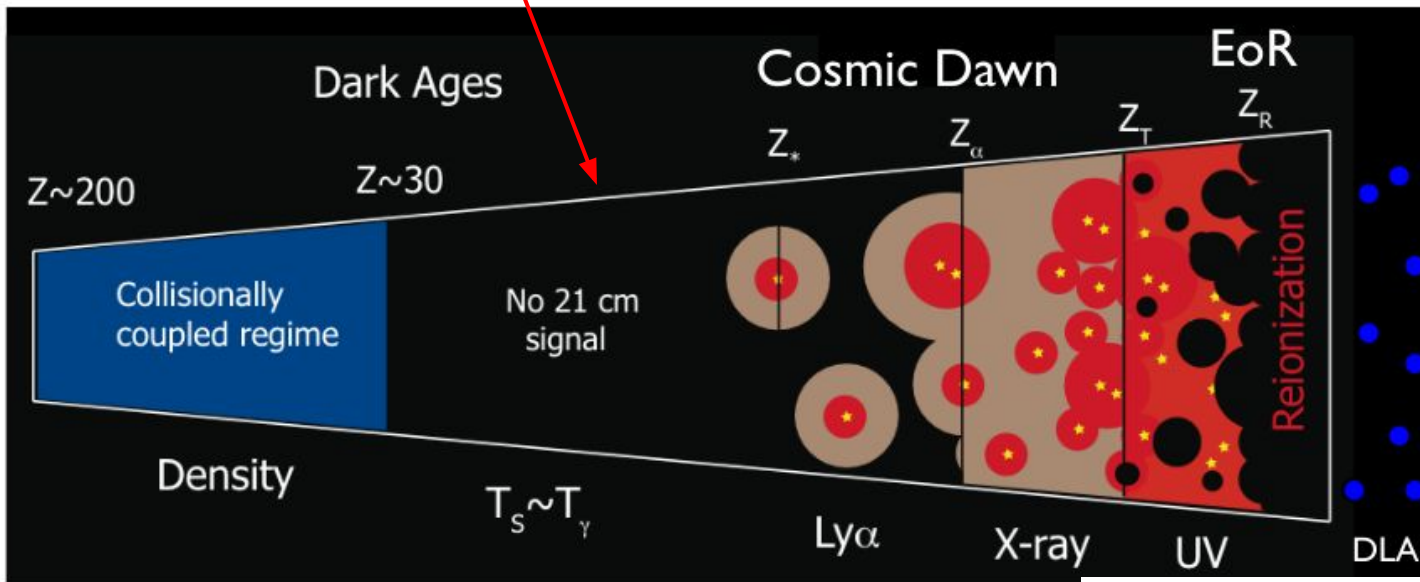
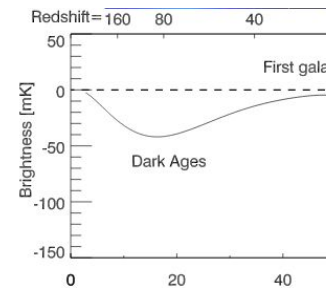
Previo a $z \sim 200$, sólo había hidrógeno y helio en cantidades significativas. La fracción residual de electrones libres hace que el gas se mantenga acoplado al CMB por dispersión de Compton, por lo que no hay señal de 21 cm.

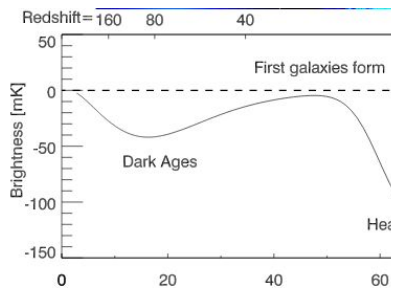


Entre $z \sim 200$ y $z \sim 30$, el gas se enfría adiabáticamente con $T_K \propto (1+z)^2$, de manera que $T_K < T_\gamma$. La alta densidad acopla los electrones al gas y $T_S < T_\gamma$, de manera que se produce un brillo negativo. Las fluctuaciones son producto de las fluctuaciones iniciales de densidad.

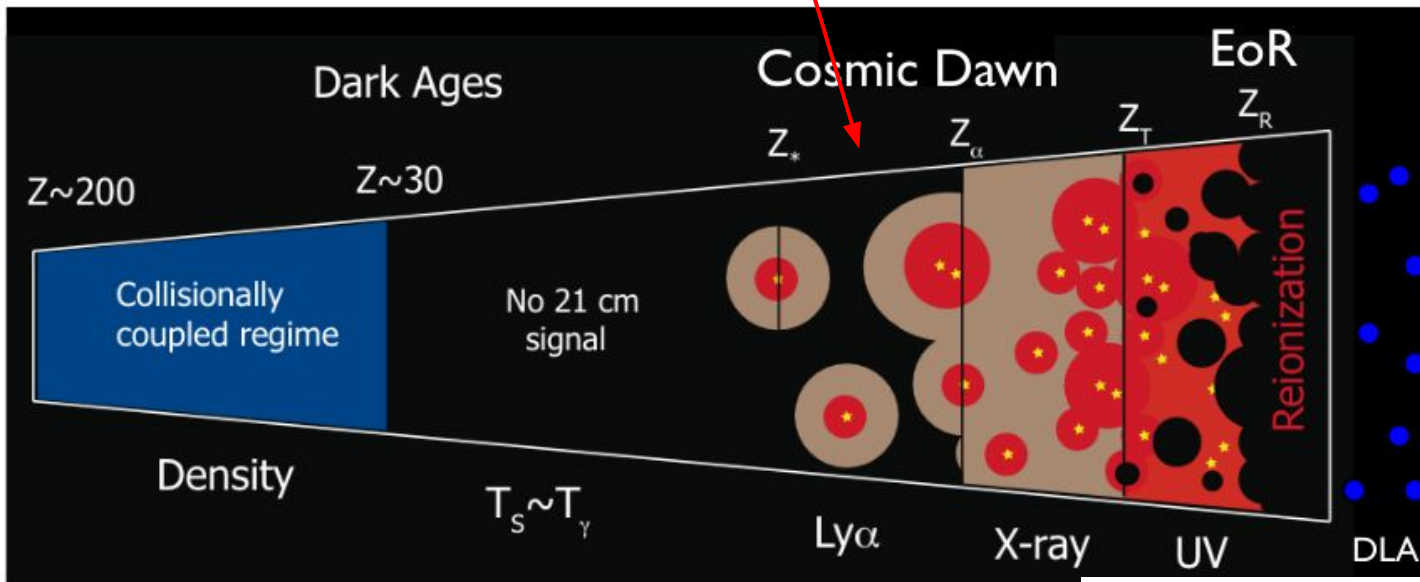


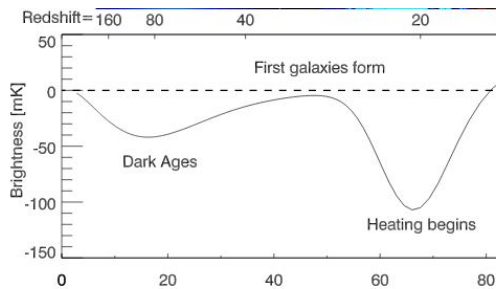
Entre $z \sim 30$ y la formación de las primeras fuentes luminosas, la expansión hace disminuir la densidad del gas y las colisiones dejan de calentar eficientemente el gas, de manera que $T_S \rightarrow T_\gamma$ y la señal de 21 cm tiende a cero.



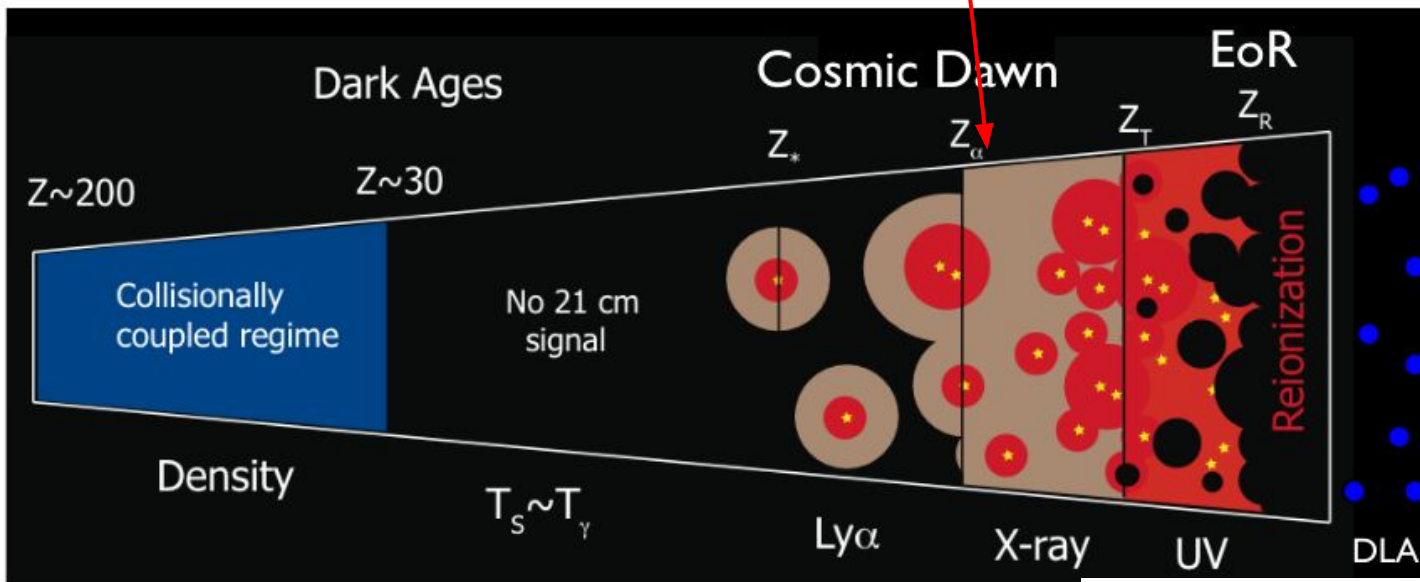


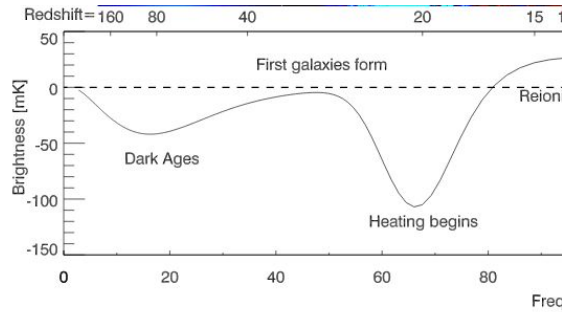
Las primeras fuentes emiten fotones de Ly α y rayos X. El acoplamiento de Ly α mantiene el gas frío, $T_S \sim T_K < T_\gamma$, por lo que la señal de 21 cm se observa en absorción.



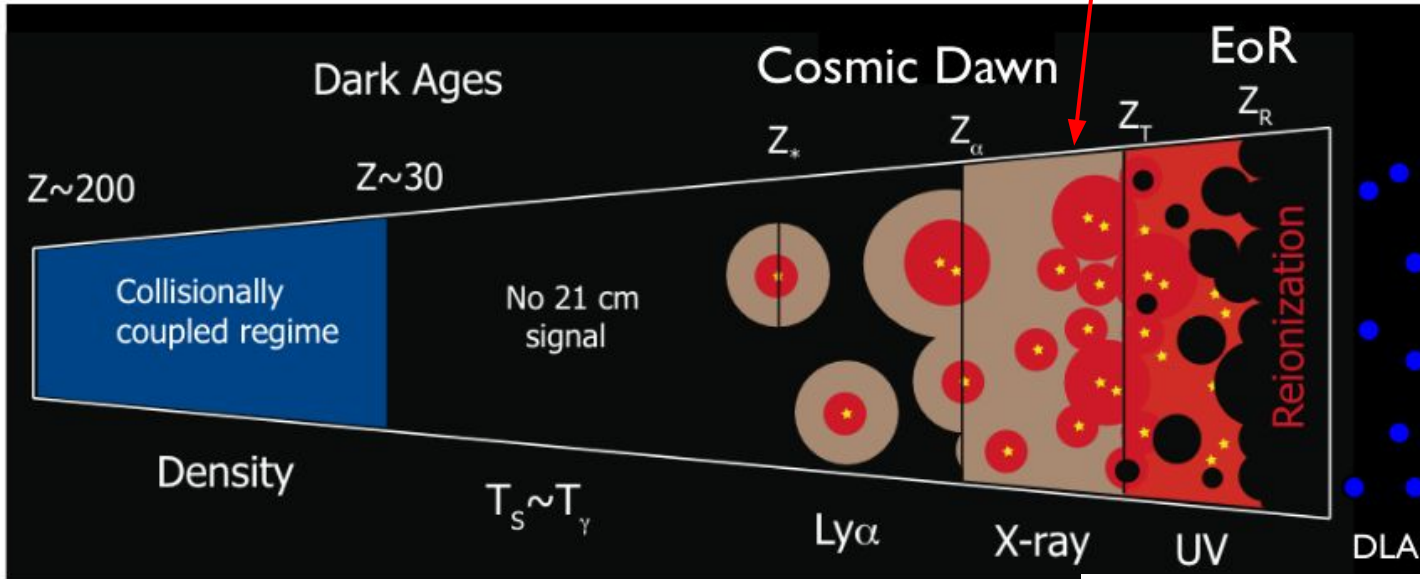


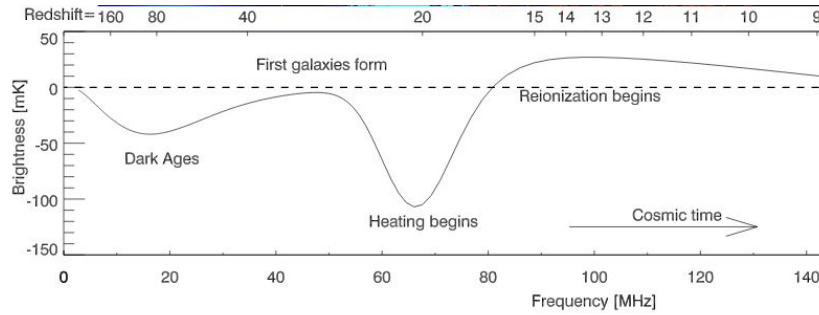
El acoplamiento de $\text{Ly}\alpha$ se satura,
por lo que las fluctuaciones de $\text{Ly}\alpha$
ya no afectan la señal de 21 cm. El
gas comienza a calentarse hasta
alcanzar $T_K = T_\gamma$.



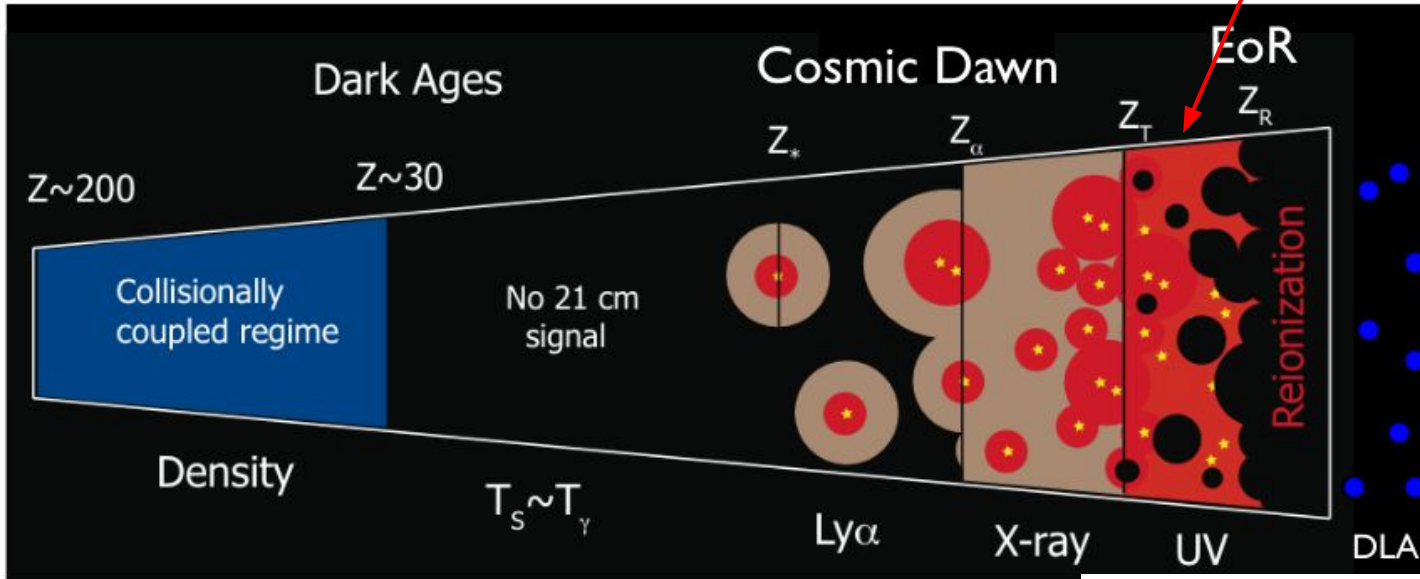


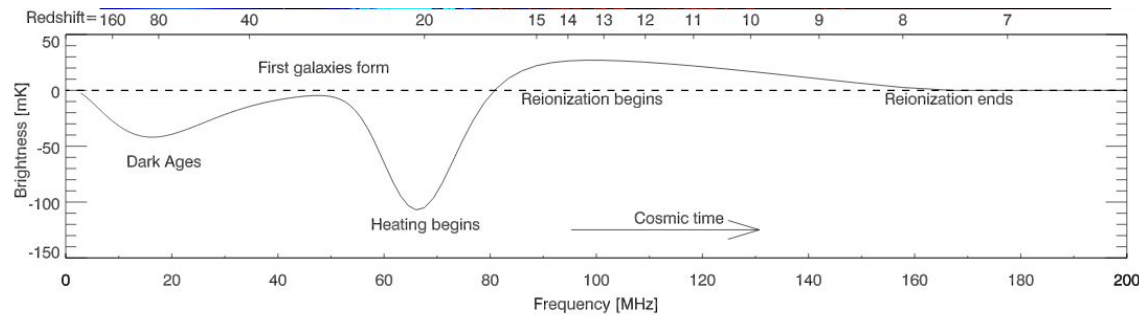
Una vez que $T_K > T_\gamma$, la señal de 21 cm se ve en emisión y la fracción de ionización probablemente ya es de algunos puntos porcentuales. Las fluctuaciones de brillo son producidas por fluctuaciones en ionización, densidad, y temperatura del gas.



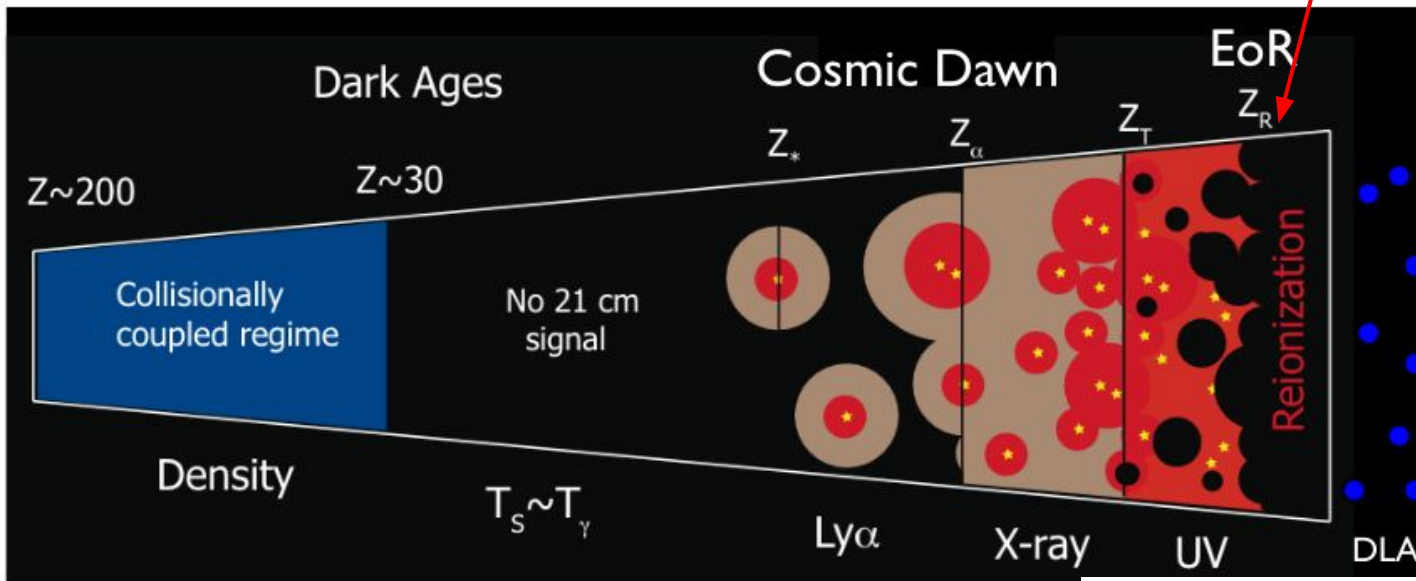


El calentamiento lleva a $T_K \gg T_\gamma$ y las fluctuaciones de temperatura dejan de ser importantes. La fracción volumétrica de HII se vuelve importante y las fluctuaciones en ionización dominan la señal de 21 cm.

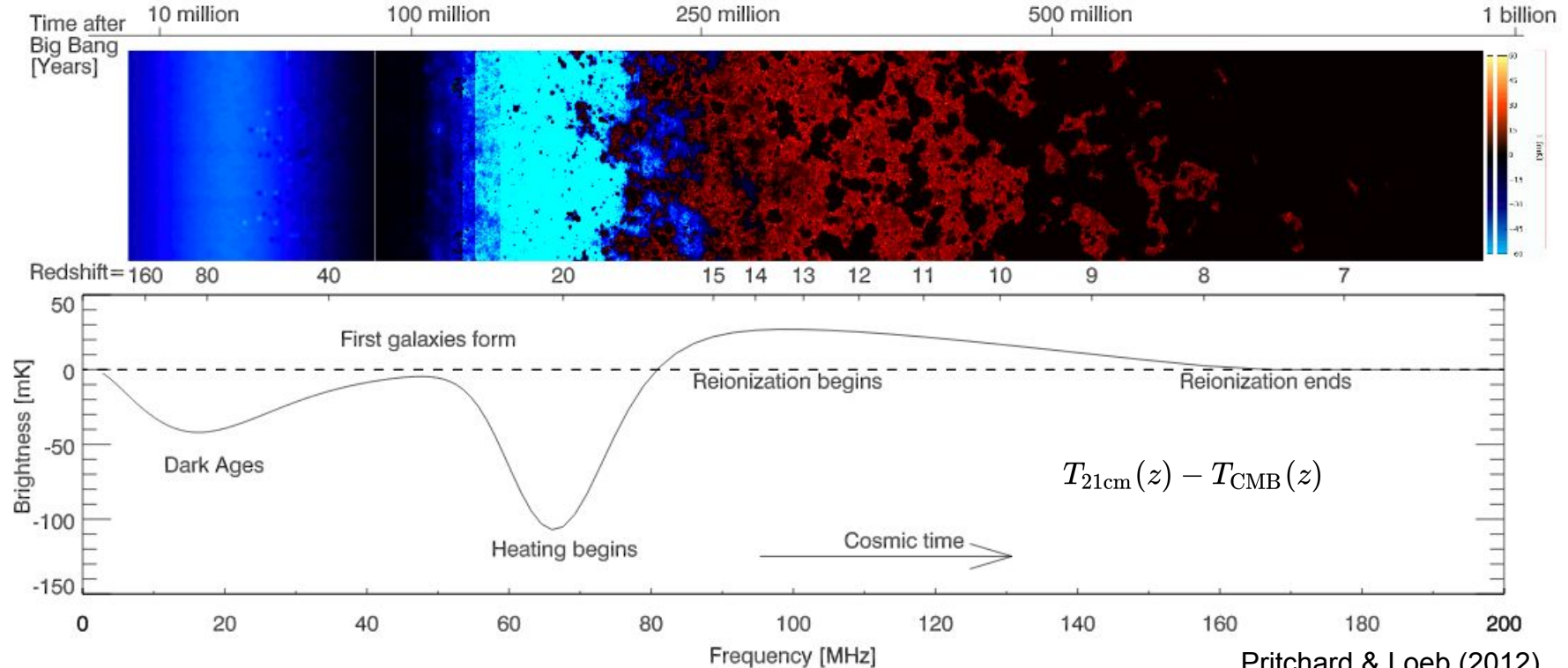




Luego de la reionización, la señal de 21 cm queda confinada a islas colapsadas de hidrógeno neutro, llamados sistemas amortiguados de Ly α (DLAs).



Trazando la historia del Universo con 21 cm

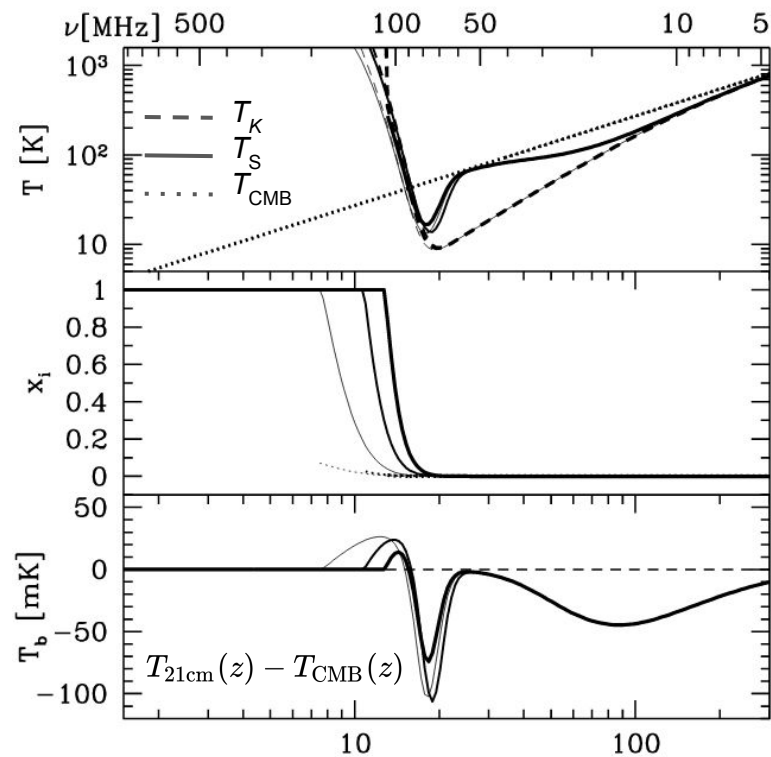


La historia del hidrógeno en la temperatura a 21 cm

En resumen, la historia del hidrógeno neutro se puede trazar buscando desviaciones de la evolución esperada simplemente por el enfriamiento debido a la expansión cosmológica,

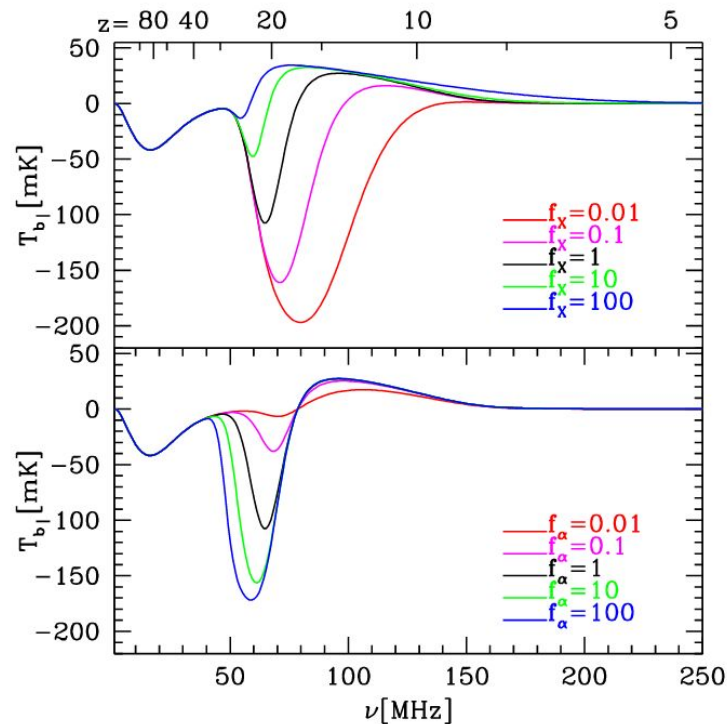
$$T_{\text{CMB}}(z) = (1+z)T_{\text{CMB}}(0) = 2.726(1+z)$$

En contraste con modelos de evolución e ionización del IGM, mediciones de la señal global de 21 cm ofrecen una ventana única hacia la era pre-reionización.



El IGM pre-reionización

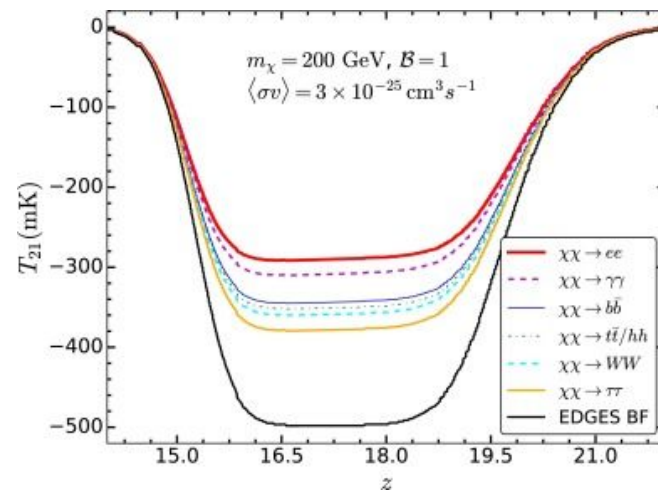
La descripción de arriba muestra que mediciones de 21 cm también pueden determinar el estado del IGM en la época de formación de las primeras galaxias, y determinar por ejemplo el calentamiento producto de emisión de rayos X o acoplamiento de Ly α , lo que entrega información respecto de cuándo se formaron las primeras galaxias y los primeros agujeros negros, y sus distribuciones de masa.



Una historia de cautela

Bowman et al. (2018) reportaron la primera detección de absorción de HI a $z \sim 17$ con el experimento EDGES, con una amplitud mayor a la predicha incluso por modelos de aniquilación de materia oscura o de interacciones de la materia oscura con bariones.

Sin embargo, se ha argumentado que este resultado depende fuertemente del modelamiento de fuentes contaminantes, y al día de hoy no está claro cuál es el origen de esta señal (i.e., instrumental, astrofísica o cosmológica).



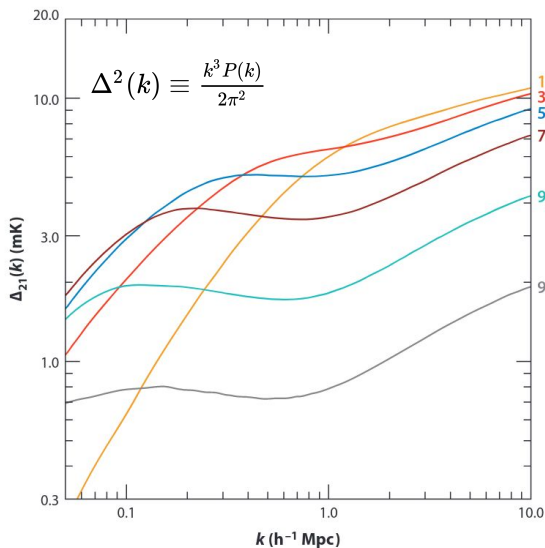
Espectro de potencias de fluctuaciones en 21 cm

Como otros observables cosmológicos, es natural estudiar las fluctuaciones en 21 cm en términos del espectro de potencias, que depende de la cosmología a través de la modulación dada por el espectro de potencias del campo de densidad.

La emergencia de burbujas de HII transfiere potencia desde escalas pequeñas a escalas más grandes con el paso del tiempo, además de una supresión generalizada de la potencia de HI debido a su desaparición.

Recuerden que la evolución se puede mapear gracias al redshift:

$$\nu_{\text{obs}} = \frac{\nu_{\text{em}}}{1+z}$$



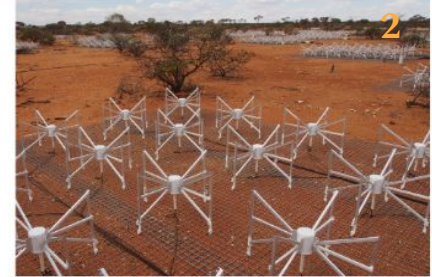
Fracción de hidrógeno ionizado promedio en el Universo (el tiempo avanza hacia mayor ionización).

Modelo de Universo 98% ionizado a $z=6.5$

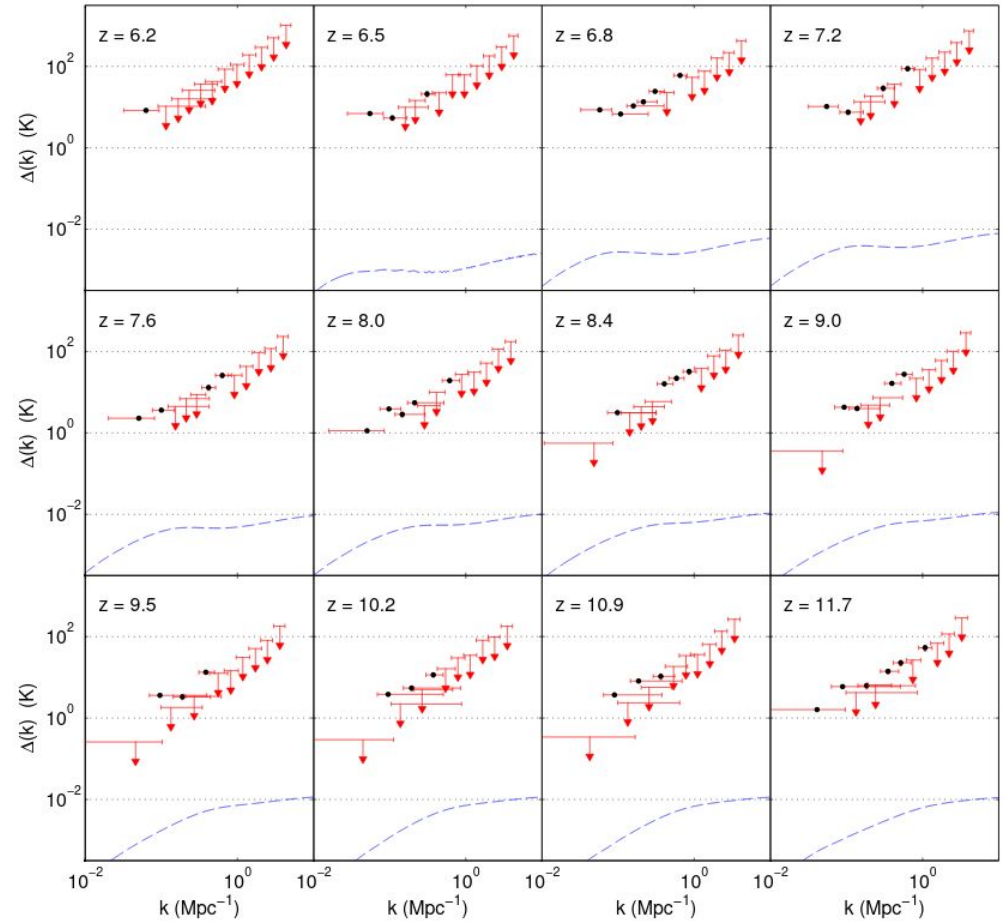
Barkana (2009)

Experimentos actuales de reionización en 21 cm

	Ubicación	Frecuencias (redshift)	Antenas	Desde
1) PAPER	Sudáfrica + EEUU	100 - 200 MHz (7 - 12)	64 + 32	2009
2) MWA	Australia	70 - 300 MHz (4 - 18)	256 x 16	2013
3) LOFAR	Holanda	30 - 240 MHz (5 - 40)	ca. 20.000	2012
4) GMRT	India	50 - 1500 MHz (0 - 25)	30 x 45 m	1995

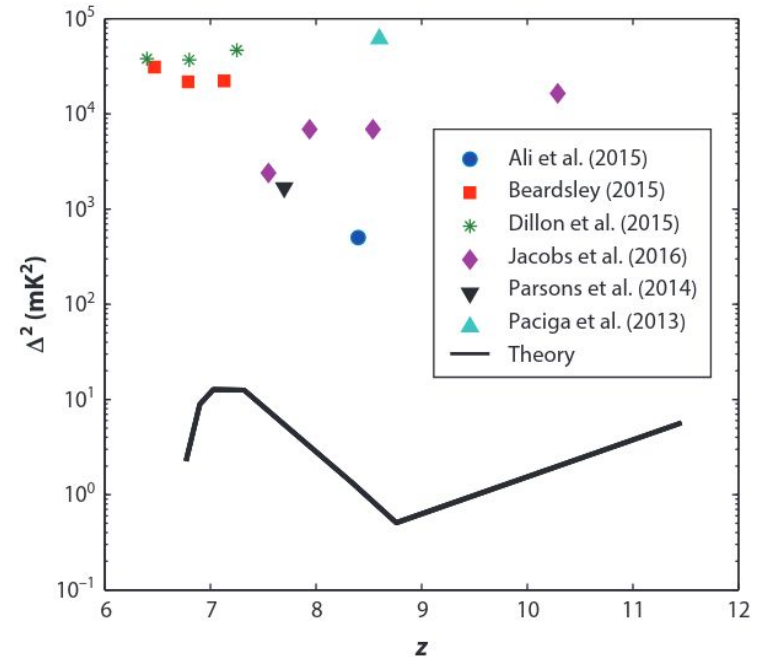


Límites superiores en el espectro de potencias de 21 cm a diferentes redshifts con el MWA. Como todos los demás, este observatorio todavía está lejos de poder detectar el espectro de potencias de 21 cm en la época de reionización.



Dillon et al. (2014)

Otra vista del estado actual de las mediciones del espectro de potencias de la línea de 21 cm en la época de reionización. Se muestran los límites superiores a una escala de $k = 0.2 \ h^{-1}\text{Mpc}$ para distintos experimentos, comparados con el valor esperado teóricamente, que es al menos dos órdenes de magnitud menor.



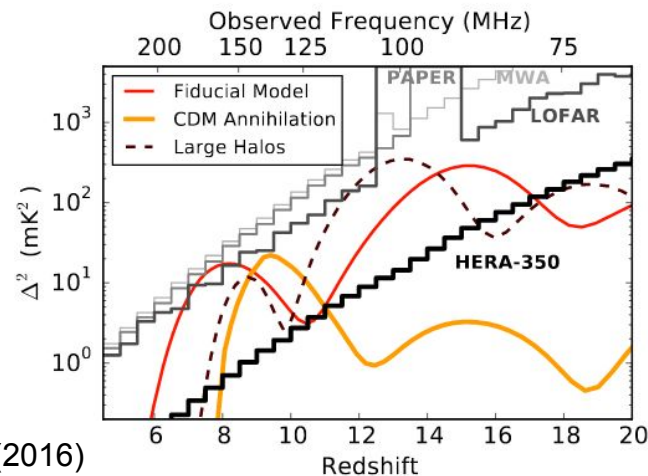
McQuinn (2016) adaptado de Beardsley (2015)

Hydrogen Epoch of Reionization Array (HERA)

HERA es uno de dos experimentos de reionización de alta resolución financiados para la próxima década, y está siendo construido en la Reserva Karoo para Radio Astronomía en Sudáfrica.

Una vez completo consistirá de 350 antenas de 14 m de diámetro en una configuración hexagonal densa, con el objetivo de medir el espectro de potencias desde la época de formación de las primeras galaxias hasta el fin de la reionización.

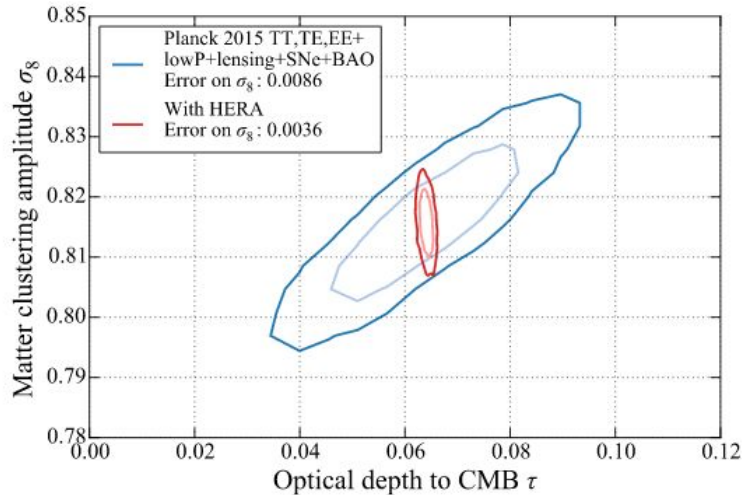
La sensibilidad de HERA será suficiente para medir la historia de HI entre $z \sim 16$ y $z \sim 6$.



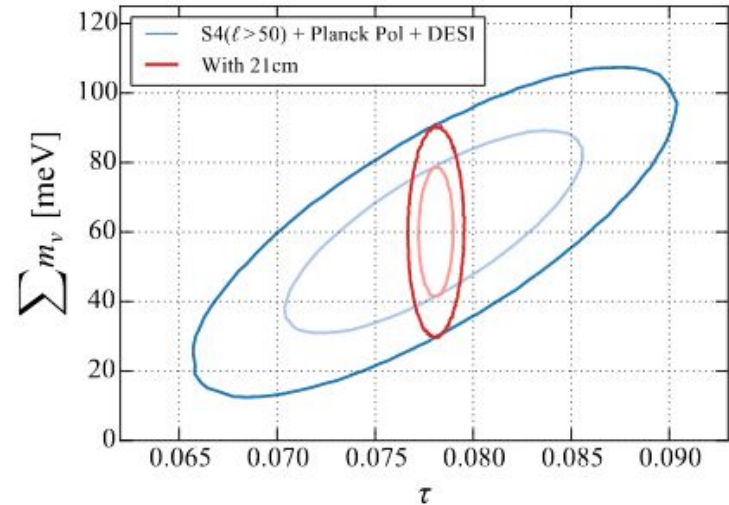
DeBoer et al. (2016)

Además, al medir directamente la evolución de la profundidad óptica de HI, HERA podrá romper la principal degeneración restante en las observaciones del CMB (como veremos más adelante), ya que el CMB depende sólo de la integral de la profundidad óptica desde la recombinación hasta redshift 0, mientras que HERA podrá medir $\tau_v(z)$ en la era más difícil de modelar, cuando se formaron las primeras galaxias.

Los contornos rojos muestran la ganancia producto de HERA en nuestro conocimiento actual de τ_v (izquierda) y en la determinación que será posible con la próxima generación de experimentos (derecha).



DeBoer et al. (2016)



Liu et al. (2016)

Referencias

- Barkana, R., 2009. *Studying the sources of cosmic reionization with 21-cm fluctuations*. [MNRAS, 397, 1454](#)
- Bowman, J., et al., 2018. *An absorption profile centred at 78 megahertz in the sky-averaged spectrum*. [Nature, 555, 67](#)
- Cheung, K., et al., 2019. *The impact of EDGES 21-cm data on dark matter interactions*. [PhLB, 789, 137](#)
- DeBoer, D., et al., 2016. *Hydrogen Epoch of Reionization Array (HERA)*. [PASP, 129, 5001](#)
- Dillon, J., et al., 2014. *Overcoming real-world obstacles in 21 cm power spectrum estimation: A method demonstration and results from early Murchison Widefield Array data*. [PhRvD, 89, 3002](#)
- Dillon, J., 2015. *It's Always Darkest Before the Cosmic Dawn: Early Results from Novel Tools and Telescopes for 21 cm Cosmology*. [PhD Thesis, Massachusetts Institute of Technology](#)
- Ewen, H., & Purcell, E., 1951. *Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: Radiation from Galactic Hydrogen at 1,420 Mc./sec.*. [Nature, 168, 356](#)
- Liu, A., et al., 2016. *Eliminating the optical depth nuisance from the CMB with 21 cm cosmology*. [PhRvD, 93, 3013](#)
- McQuinn, M., 2016. *The Evolution of the Intergalactic Medium*. [ARA&A, 54, 313](#)
- Morales, M., & Wyithe, S., 2010. *Reionization and Cosmology with 21-cm Fluctuations*. [ARA&A, 48, 127](#)
- Muller, C., & Oort, J., 1951. *Observation of a Line in the Galactic Radio Spectrum: The Interstellar Hydrogen Line at 1,420 Mc./sec., and an Estimate of Galactic Rotation*. [Nature, 168, 357](#)
- Pritchard, J., & Loeb, A., 2012. *21 cm cosmology in the 21st century*. [RPPH, 75, 6901](#)