

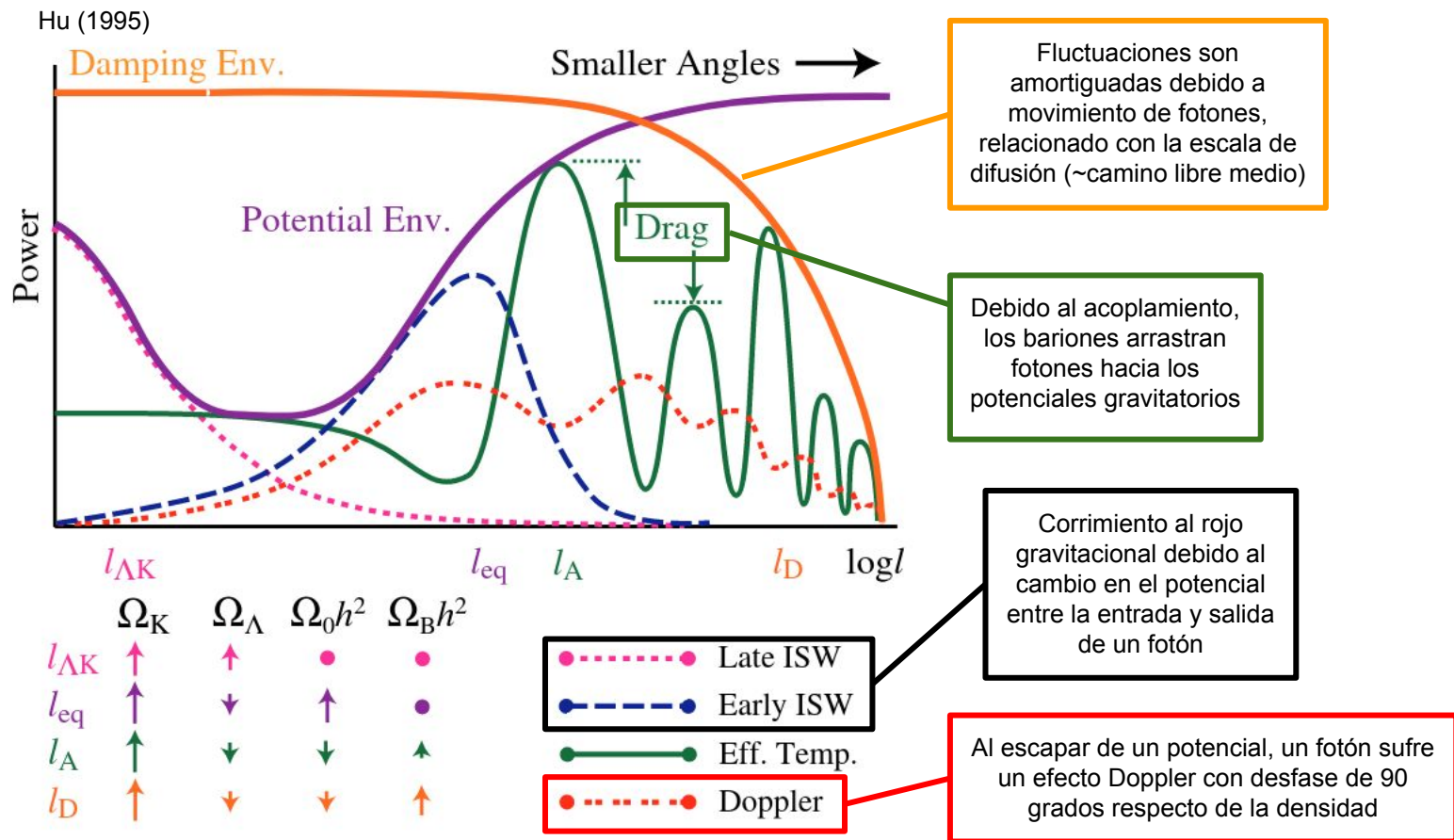
Unidad V.

Fondo Cósmico de Microondas

Parte 3: Anisotropías secundarias y parámetros cosmológicos con Planck

Recordatorio...

Anisotropías primarias del CMB



Sigamos!

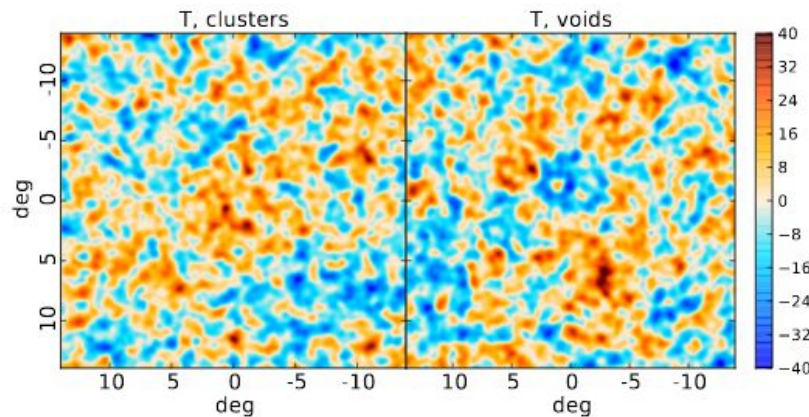
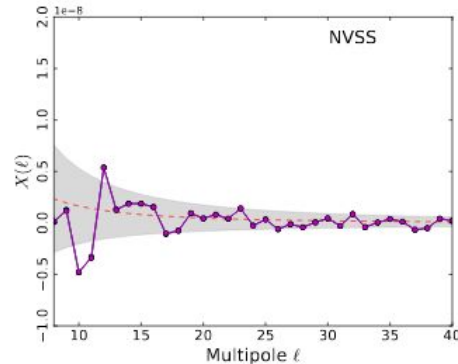
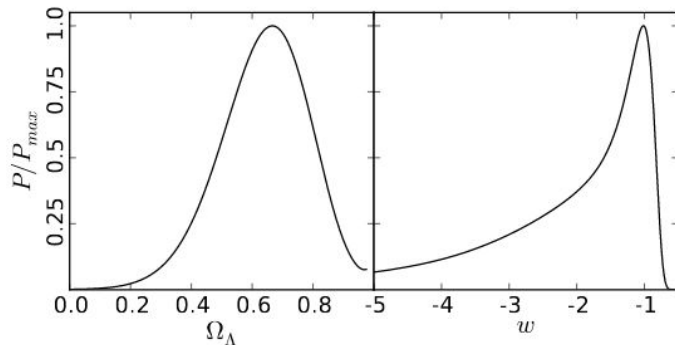
Anisotropías secundarias

A las anisotropías producidas en la superficie de última dispersión se les conoce como **anisotropías primarias**. Además del efecto Sachs-Wolfe Integrado tardío que vimos la clase anterior, los fotones del CMB también se ven afectados por estructuras o procesos en el Universo tardío, mucho después de la superficie de última dispersión. Las anisotropías introducidas por estos efectos se conocen como **anisotropías secundarias**. Las más importantes son:

- Efecto Rees-Sciama: versión no-lineal del efecto Sachs-Wolfe integrado.
- Efecto Sunyaev-Zel'dovich: Los electrones libres en halos masivos entregan energía a los fotones del fondo cósmico por dispersión de Compton inversa.
- Lente gravitacional: Los fotones se desvían alrededor de potenciales gravitatorios.
- Reionización: Los electrones liberados al momento de reionización dispersan los fotones del fondo cósmico.
- Fuentes que emiten en las frecuencias relevantes, ya sea resueltas como fuentes puntuales, o no-resueltas como parte del Fondo Cósmico de Infrarrojo (CIB).
- La Galaxia.

Efecto Sachs-Wolfe Integrado

Ya revisamos la teoría del efecto ISW. Aquí una demostración de la medición de este efecto usando (1) la cros-correlación de los mapas de temperatura de Planck con un catálogo de galaxias construido en ondas de radio (NVSS), y (2) sumando los mapas alrededor de supercúmulos y supervacíos. Las restricciones en los parámetros cosmológicos más relevante están abajo.



Efecto Sunyaev-Zel'dovich Termal

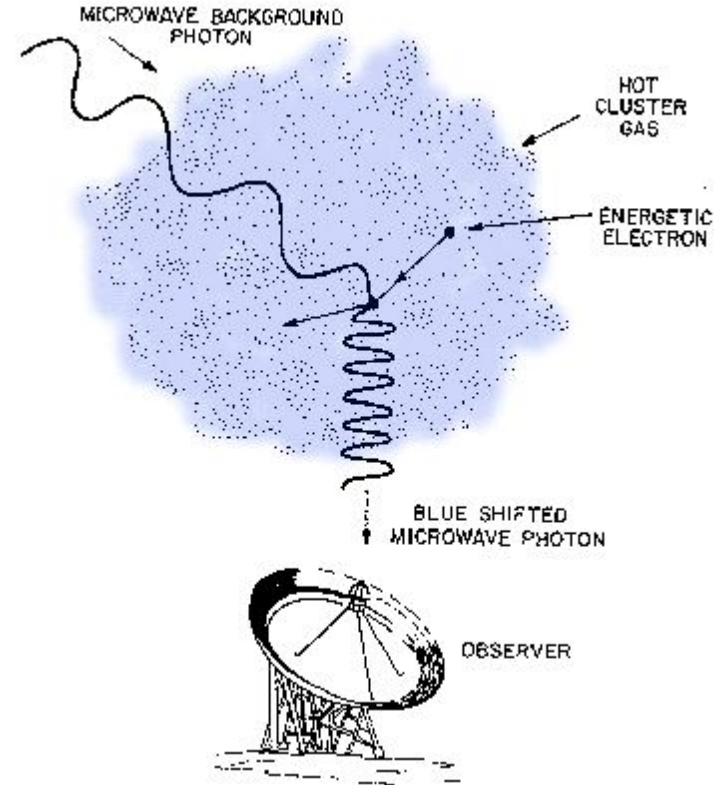
Ya vimos el efecto SZ térmico (tSZ) en el contexto de observaciones de cúmulos de galaxias: dada la alta temperatura y la alta densidad del gas de electrones, los fotones del fondo cósmico son dispersados y ganan energía. En el límite no-relativista, la amplitud del efecto es

$$\frac{(\Delta T)_{\text{tSZ}}}{T} = \left(\frac{x(e^x + 1)}{e^x - 1} \right) y$$

con

$$x \equiv h\nu/kT$$
$$y = \frac{k\sigma_T}{m_e c^2} \int d\ell n_e T_e$$

donde la integral es a lo largo de la línea de visión, de manera que este efecto es proporcional a la presión total del gas.

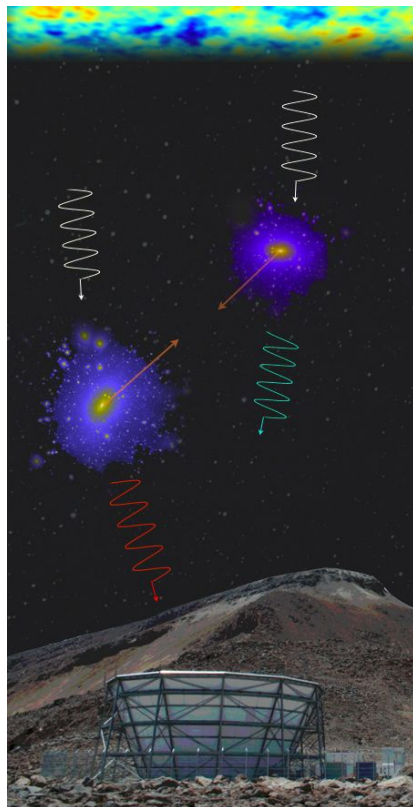


Efecto Sunyaev-Zel'dovich Cinético

El efecto Sunyaev-Zel'dovich cinético (kSZ) corresponde a la dispersión coherente de fotones por parte de electrones con una velocidad sistémica respecto del fondo cósmico. Su intensidad es

$$\frac{(\Delta T)_{\text{kSZ}}}{T} = -\frac{\sigma_T}{c} \int d\ell n_e (\mathbf{v} \cdot \hat{\mathbf{r}})$$

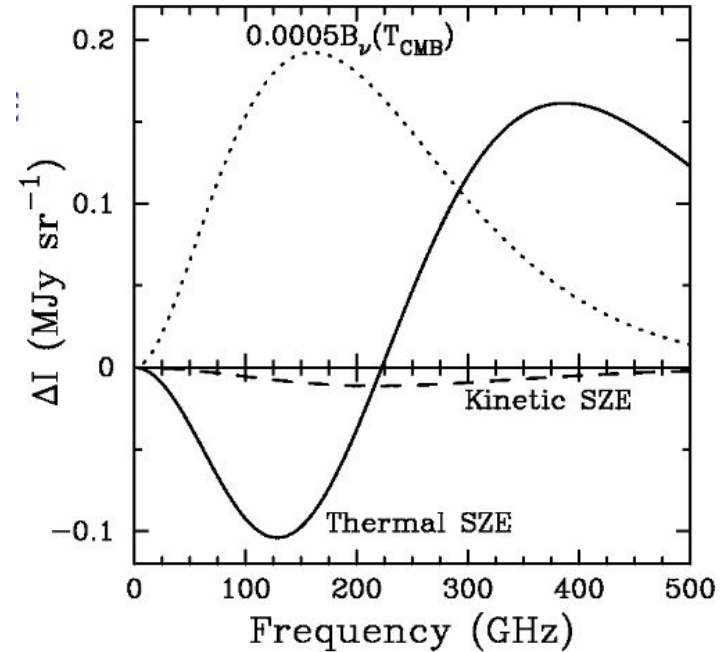
donde $\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}$ es la velocidad en la línea de visión. A diferencia del efecto tSZ, el efecto kSZ es independiente de la frecuencia y no se puede extraer directamente de un mapa de CMB, ni siquiera usando múltiples frecuencias.



Efectos Sunyaev-Zel'dovich

A la derecha se ve el espectro de los efectos SZ térmico y cinético. El efecto tSZ introduce una distorsión espectral muy característica, correspondiente a una baja de temperatura a frecuencias menores a 218 GHz, y un aumento de temperatura a frecuencias mayores.

El efecto kSZ, en cambio, no produce distorsiones espectrales



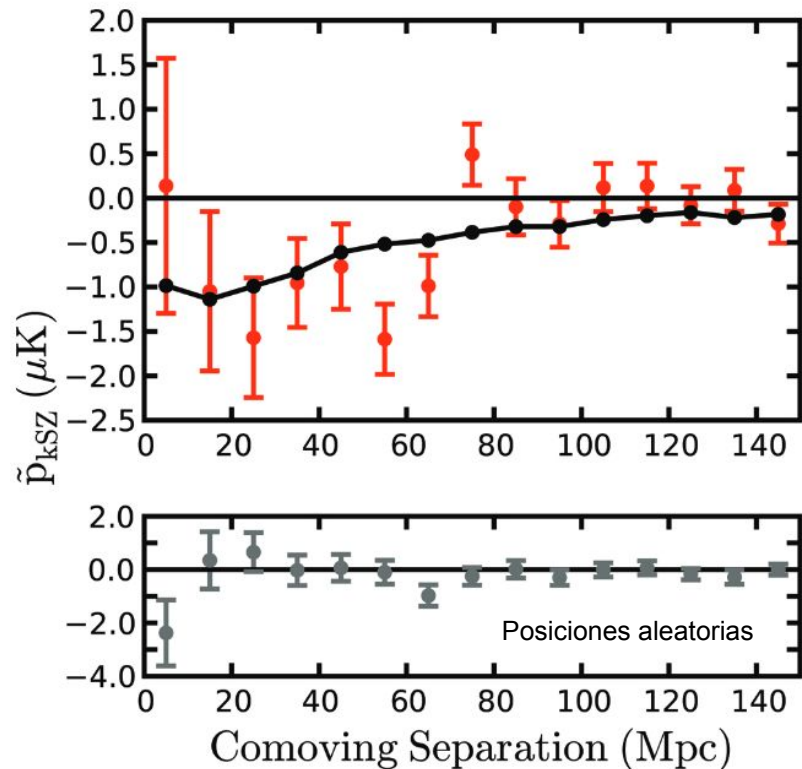
Efecto Sunyaev-Zel'dovich Cinético

Una manera de detectar el efecto kSZ estadísticamente es midiendo la velocidad relativa entre cúmulos: cúmulos cercanos entre sí se atraen gravitacionalmente, por lo que en general tendrán velocidades peculiares opuestas.

$$\tilde{p}_{\text{pair}}(r) = \frac{\sum_{i < j} (\mathbf{p}_i \cdot \hat{\mathbf{r}}_i - \mathbf{p}_j \cdot \hat{\mathbf{r}}_j) c_{ij}}{\sum_{i < j} c_{ij}^2}$$

donde c_{ij} es una medida de distancia entre los objetos i y j . Esta diferencia de momentum entre pares de cúmulos se puede medir en el CMB directamente:

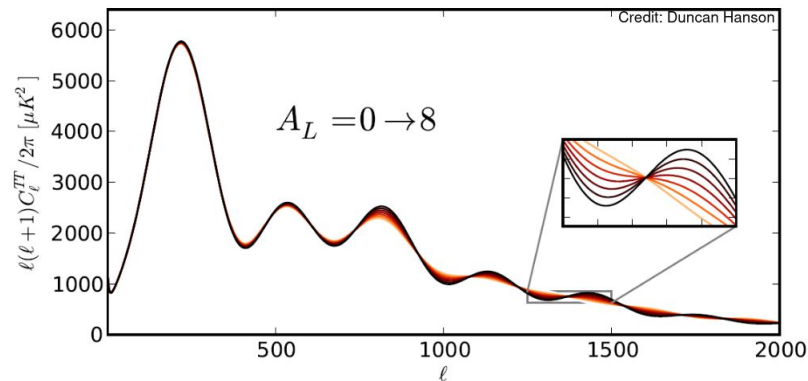
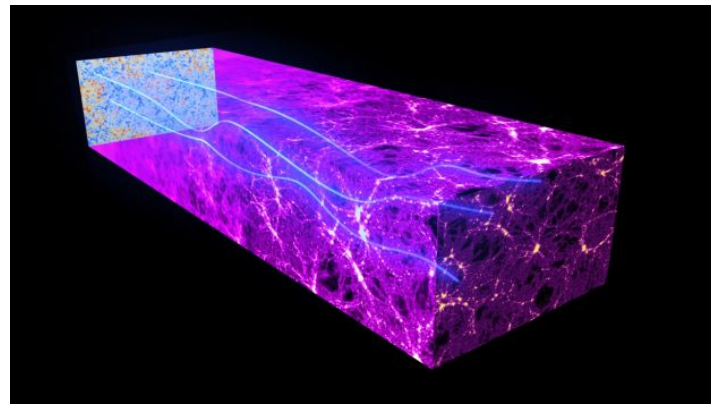
$$\tilde{p}_{\text{kSZ}}(r) = -\frac{\sum_{i < j} [(T_i - \mathcal{T}(z_i)) - (T_j - \mathcal{T}(z_j))] c_{ij}}{\sum_{i < j} c_{ij}^2}.$$



Lente gravitacional del CMB

Los fotones del fondo cósmico sufren el efecto de lente gravitacional de la misma manera que cualquier otro fotón. El proceso físico es el mismo que el caso de lente gravitacional de galaxias visto hace algunas semanas pero hay dos grandes diferencias en la práctica:

- 1) En el fondo cósmico no se observan fuentes individuales, sino un campo continuo de temperatura o polarización.
- 2) La fuente que sufre el efecto - el fondo cósmico mismo - tiene un único redshift conocido con altísima precisión, $z_s \approx 1090$.



El efecto de lente gravitacional puede ser descrito a través de un campo de deflexión, \mathbf{d} ,

$$\Theta(\hat{\mathbf{n}}) \rightarrow \tilde{\Theta}(\hat{\mathbf{n}} + d(\hat{\mathbf{n}}))$$

donde Θ puede representar el campo de temperatura o de polarización. La convergencia, κ , se relaciona al campo de deflexión según $\kappa = -\frac{1}{2}\nabla^2 \mathbf{d}$ y corresponde a la integral de la perturbación de materia a lo largo de la línea de visión, modulada por un factor geométrico $W^\kappa(z)$,

$$\kappa(\hat{\mathbf{n}}) = \int_0^{z_*} dz W^\kappa(z) \delta(\chi(z)\hat{\mathbf{n}}, z)$$

con

$$W^\kappa(z) = \frac{3}{2H(z)} \Omega_{m,0} H_0^2 (1+z) \chi(z) \frac{\chi_* - \chi(z)}{\chi_*},$$

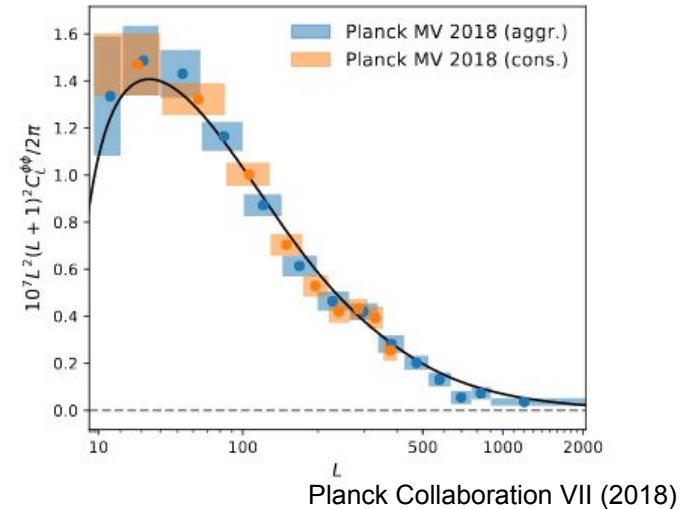
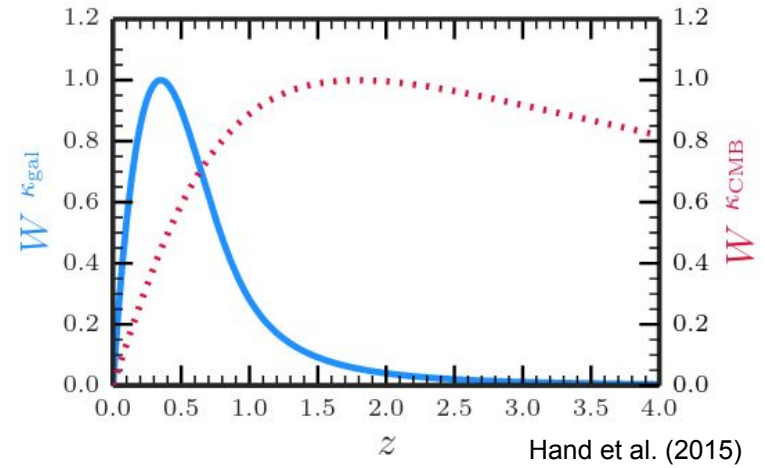
en un Universo plano. La primera relación arriba implica que el efecto de lente gravitacional acopla los campos de temperatura o polarización a ciertas escalas, y por lo tanto se puede construir un estimador del efecto de lente gravitacional en el fondo cósmico (en espacio de Fourier) de la forma

$$\bar{\kappa}^{XY}(\mathbf{L}) = A^{XY}(\mathbf{L}) \int \frac{d^2 \ell}{(2\pi)^2} X(\ell) Y(\mathbf{L} - \ell) f^{XY}(\ell, \mathbf{L})$$

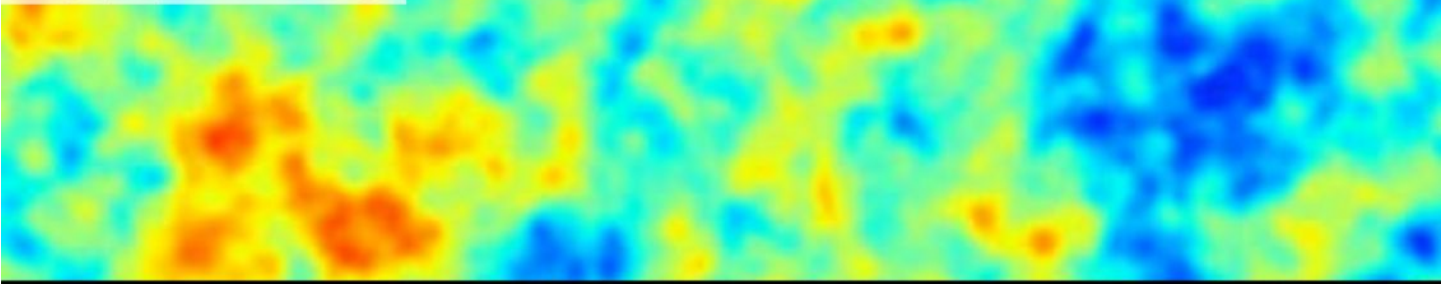
donde XY es cualquier combinación de T , E , B ; A^{XY} es una normalización dada por la cosmología, y f^{XY} codifica la transferencia de potencia a distintas escalas para cada observable.

Los fotones del fondo cósmico sufren efecto de lente por parte de estructuras durante todo su trayecto, desde que se forman las primeras estructuras hasta hoy. A la derecha se compara la contribución al efecto de lente para una medición con el CMB, y para otra con una muestra típica de galaxias.

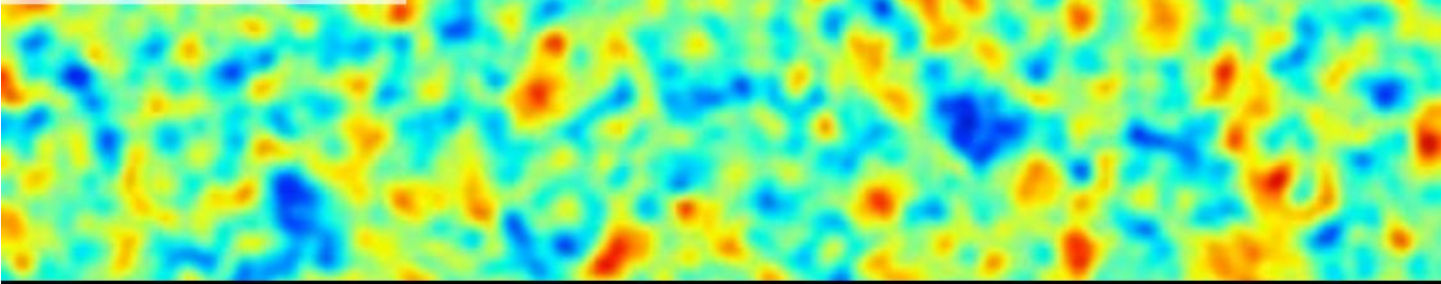
Abajo, el espectro de potencias de lente gravitacional del CMB medido por Planck.



$T(\hat{n}) (\pm 350 \mu K)$



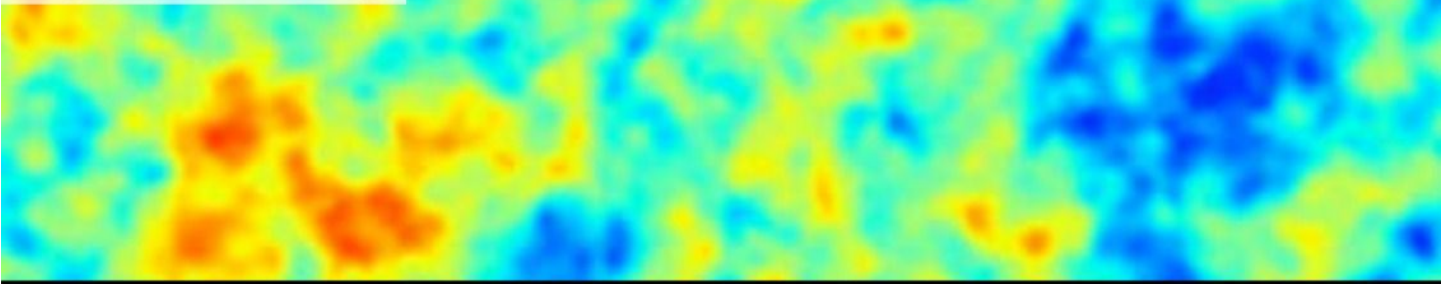
$E(\hat{n}) (\pm 25 \mu K)$



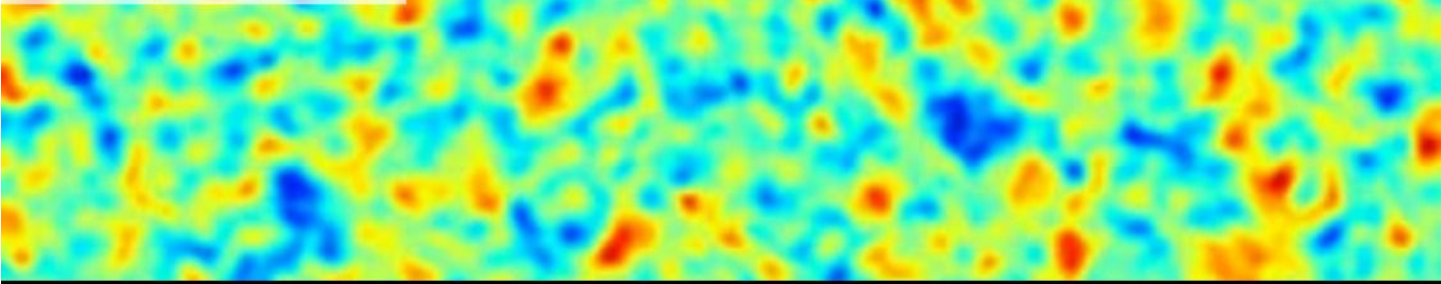
$B(\hat{n}) (\pm 2.5 \mu K)$



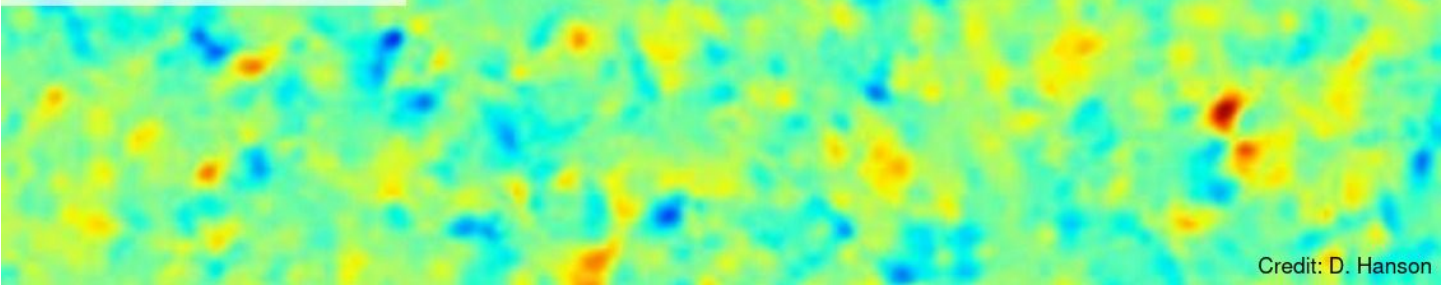
$T(\hat{n}) (\pm 350 \mu K)$



$E(\hat{n}) (\pm 25 \mu K)$



$B(\hat{n}) (\pm 2.5 \mu K)$

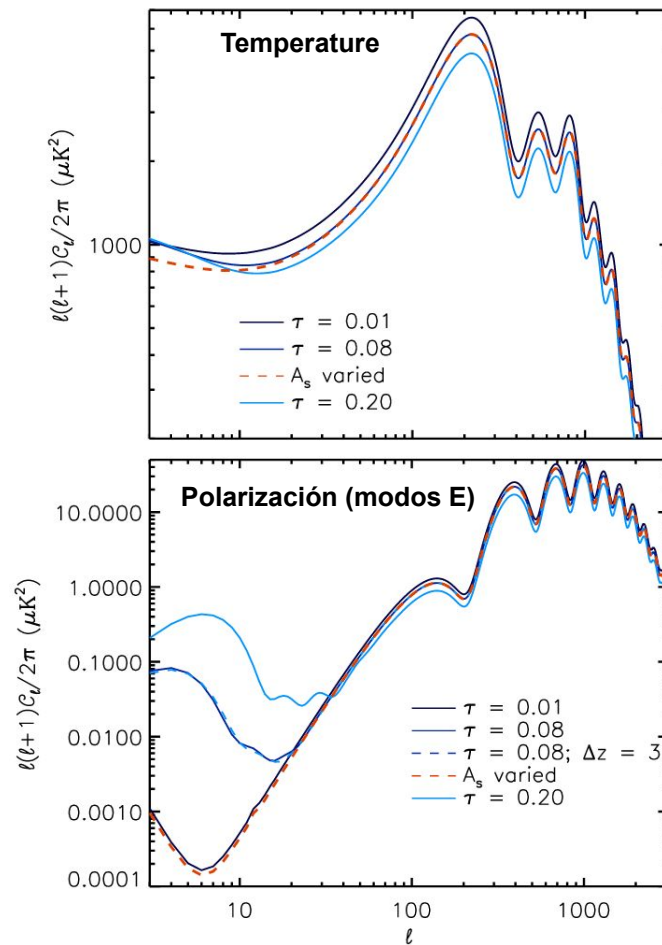


Reionización

La reionización libera una gran cantidad de electrones, que pueden dispersar los fotones del CMB a través de dispersión de Thomson. La probabilidad de que un fotón sea dispersado por un electrón libre está relacionada a la profundidad óptica de reionización,

$$\tau = \int dl n_e \sigma_T$$

que suprime las anisotropías del fondo cósmico a todas las escalas menores al horizonte al momento de reionización por un factor $e^{-2\tau}$, y produce una polarización neta a escalas mayores al horizonte que escala según τ^2 .

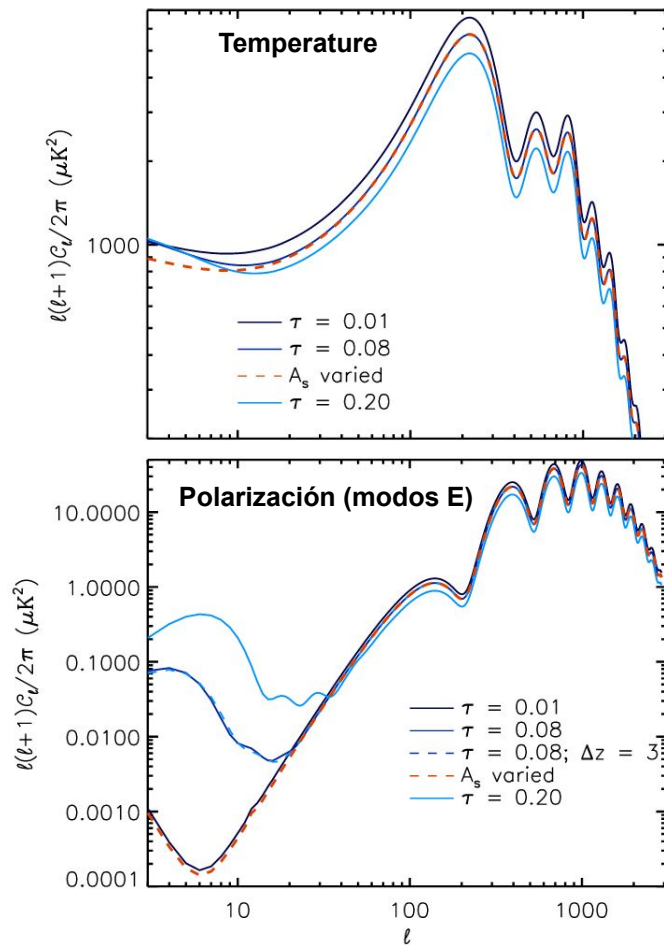


Reionización

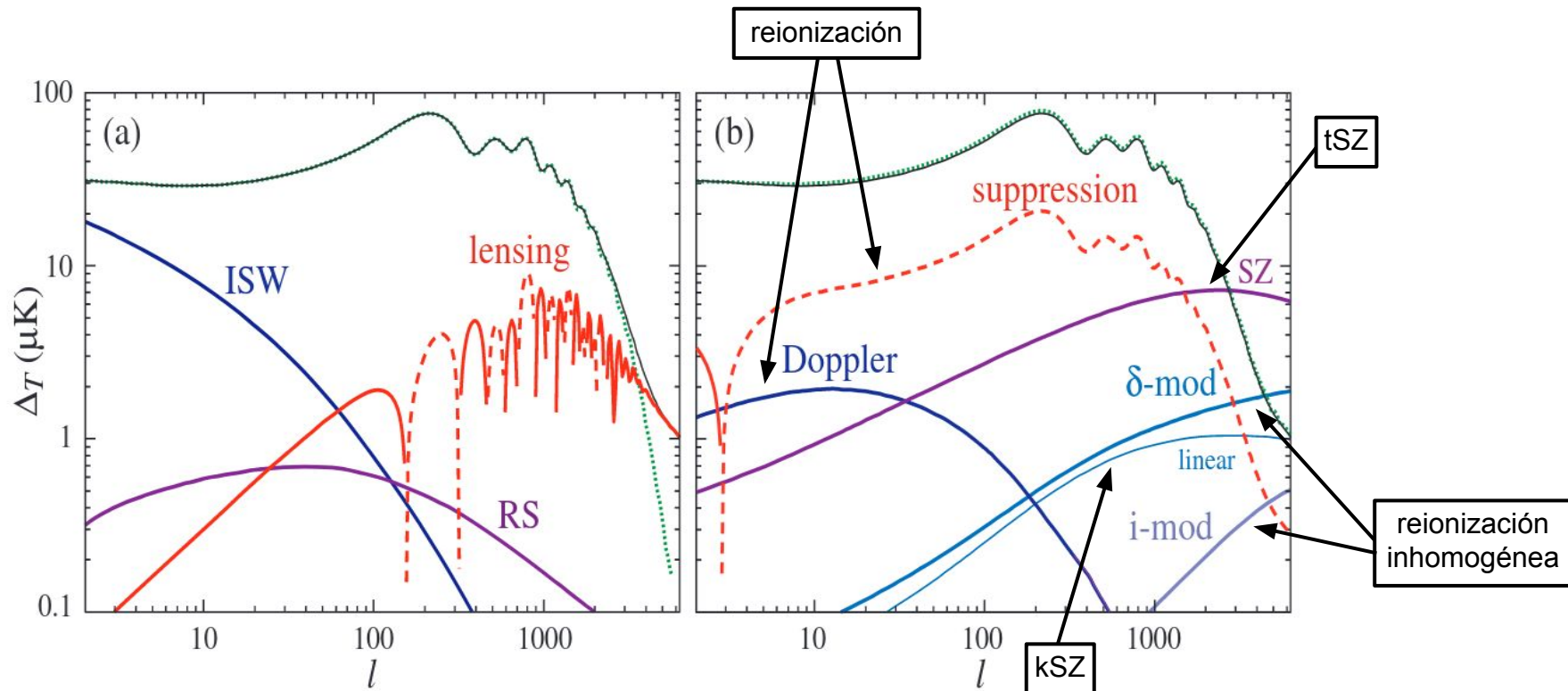
Dada la naturaleza integral de la profundidad óptica, el CMB no es muy sensible a la historia detallada de reionización.

La supresión de temperatura producida por reionización es altamente degenerada con el efecto de la amplitud de las fluctuaciones primordiales, A_s . A escalas mayores al horizonte, donde los efectos de A_s y τ se diferencian, las mediciones están dominadas por varianza cósmica.

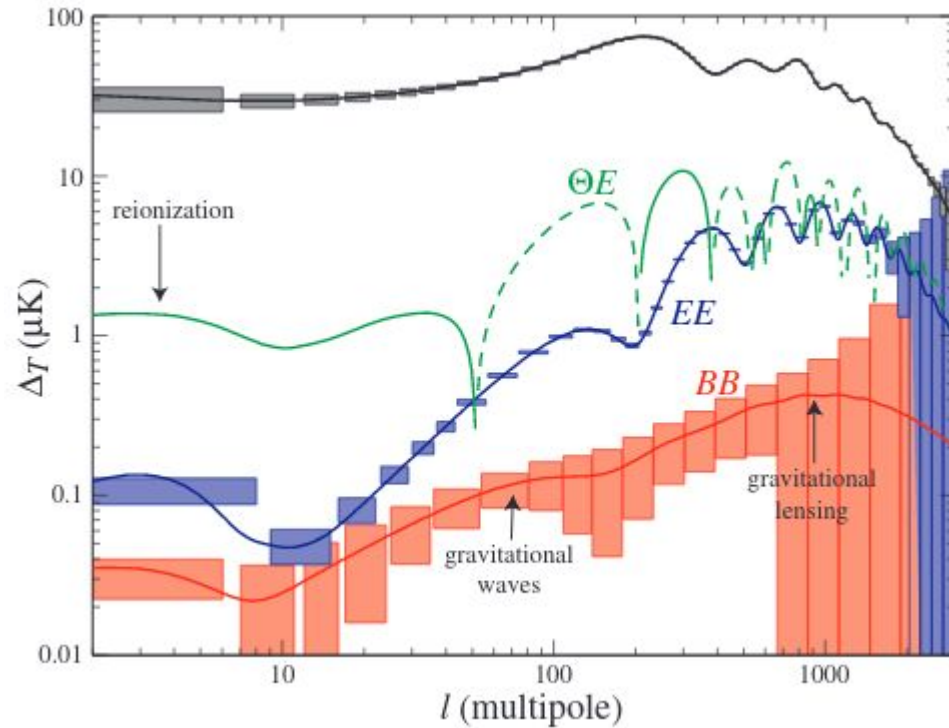
Esta degeneración se puede romper con polarización, donde el efecto a gran escala de la reionización es muy pronunciado.



Cómo impactan el espectro angular de potencias?



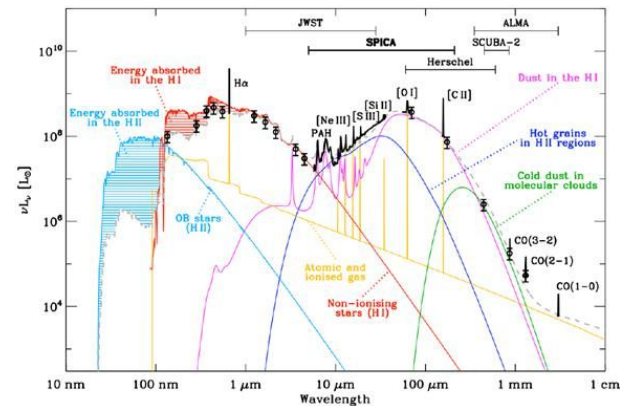
Polarización



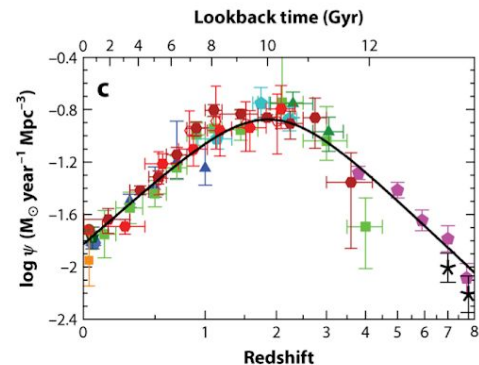
Fuentes puntuales y el fondo cósmico de infrarrojo

Las galaxias a alto redshift con alta formación estelar tienen un alto contenido de polvo, que emite termalmente en el infrarrojo y es observado en mm.

Algunas de estas galaxias pueden ser detectadas individualmente, pero la mayoría no lo son, y contribuyen al fondo cósmico de radiación infrarroja (CIB).



Galliano et al. (2008)

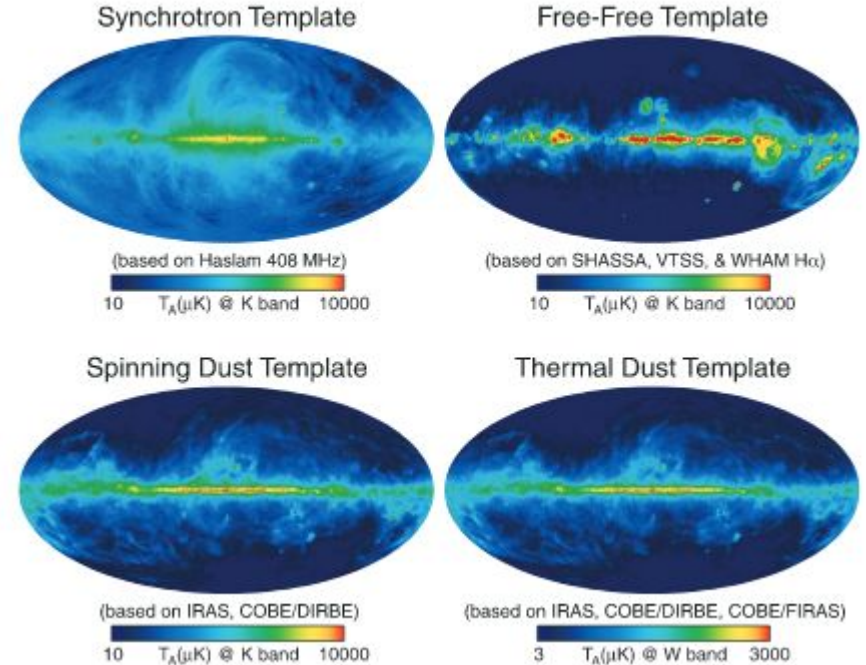


Madau & Dickinson (2014)

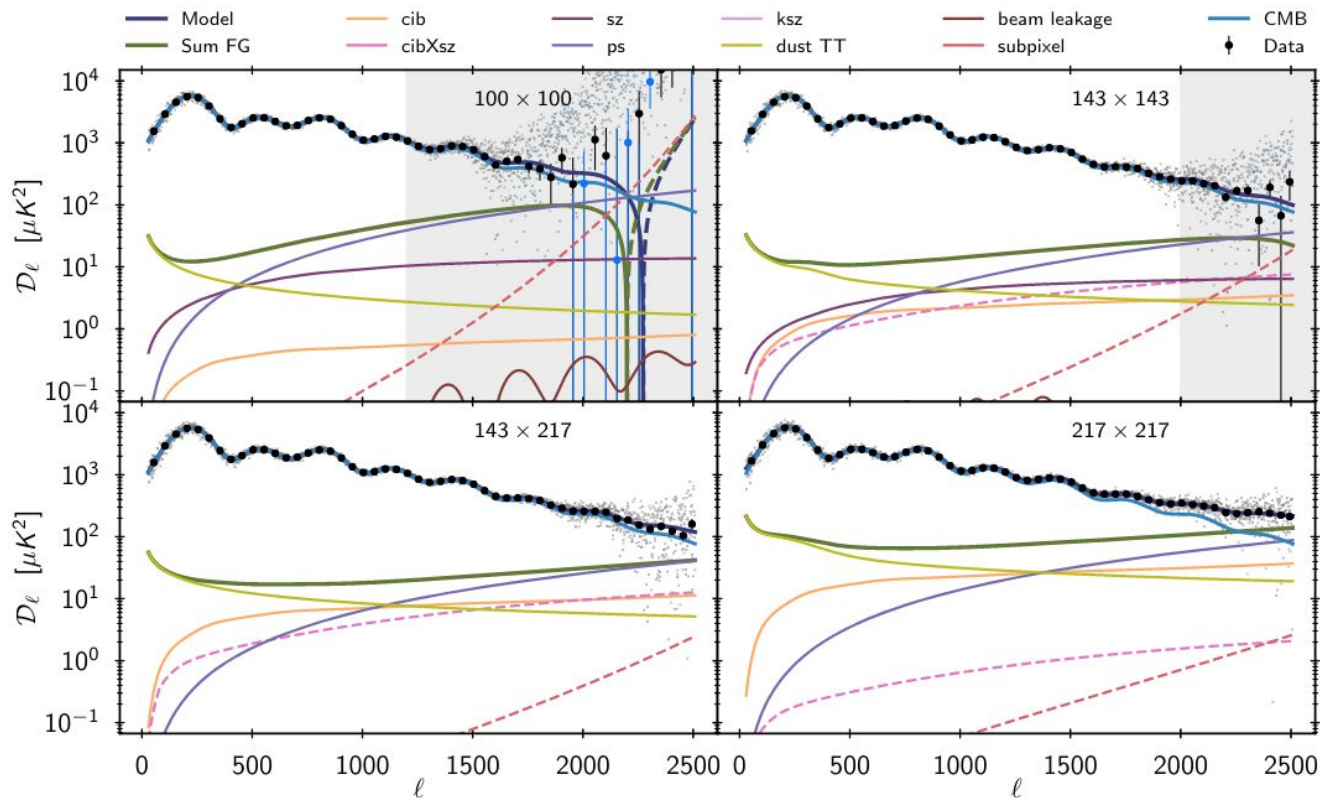
La Galaxia

Las siguientes son las principales contribuciones Galácticas en ondas de mm:

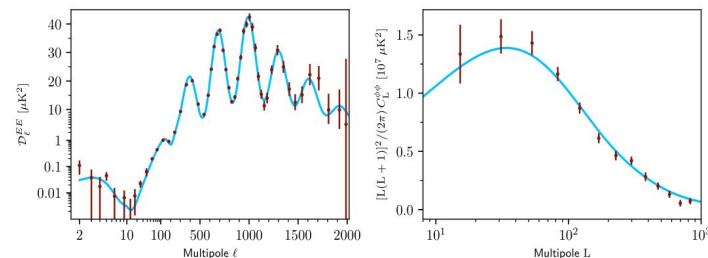
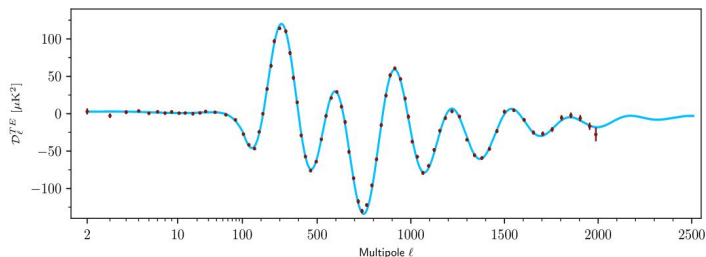
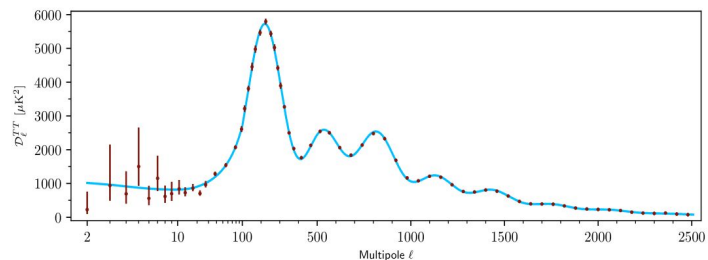
- Radiación sincrotrón de electrones relativistas (principalmente acelerados por supernovas) interactuando con el campo magnético de la Galaxia;
- Emisión por bremsstrahlung termal en nubes de HII (“libre-libre”);
- Emisión de polvo excitado por nubes de gas en moléculas orgánicas (PAHs); y
- Emisión termal del polvo Galáctico



Modelo total de Planck



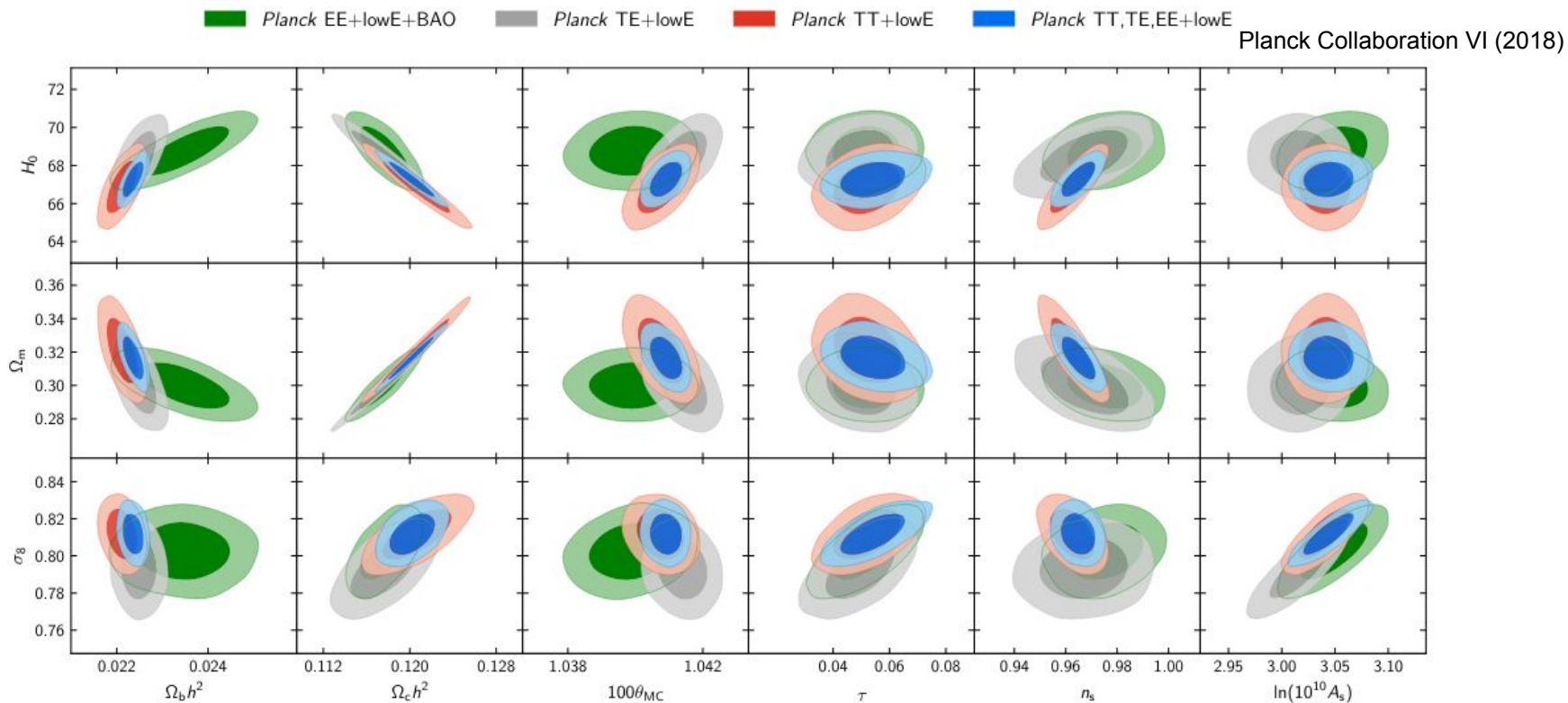
Parámetros cosmológicos con Planck



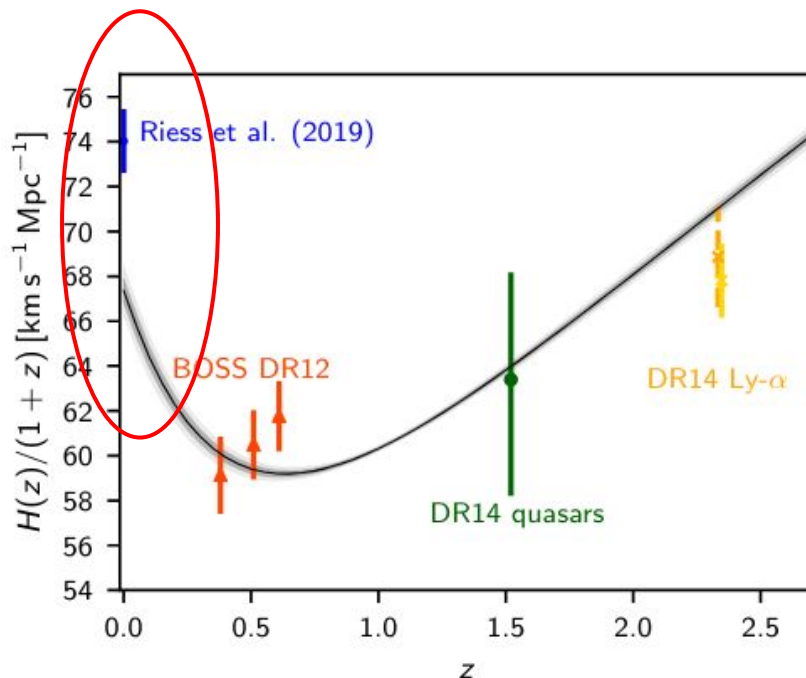
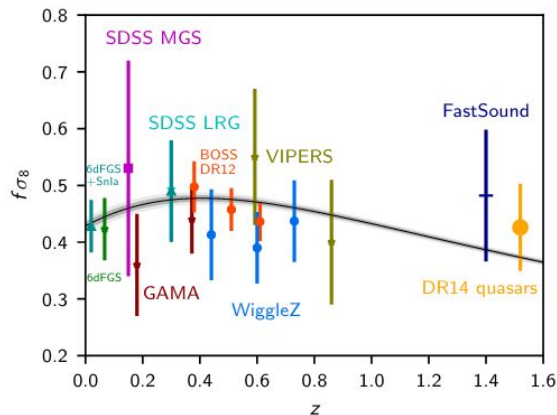
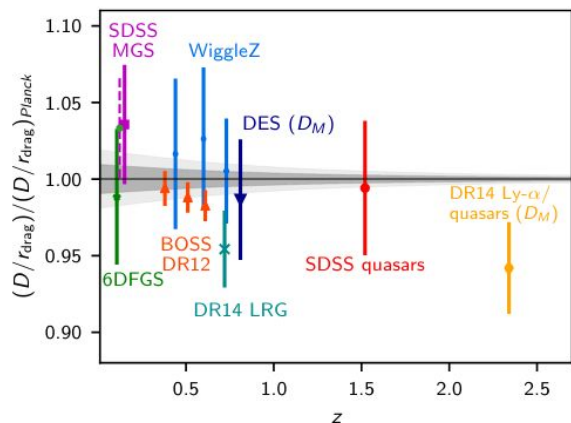
Prediction	Measurement
A spatially flat universe	$\Omega_K = 0.0007 \pm 0.0019$
with a <i>nearly</i> scale-invariant (red) spectrum of density perturbations, which is almost a power law, dominated by scalar perturbations, which are Gaussian and adiabatic, with negligible topological defects	$n_s = 0.967 \pm 0.004$ $dn/d \ln k = -0.0042 \pm 0.0067$ $r_{0.002} < 0.065$ $f_{NL} = -0.9 \pm 5.1$ $\alpha_{-1} = 0.00013 \pm 0.00037$ $f < 0.01$

Planck Collaboration I (2018)

Contribución relativa de cada observable



Expansión y crecimiento de estructuras



Referencias

- Aghanim, N., et al., 2008. *Secondary anisotropies of the CMB*. [RPPh, 71, 066902](#)
- Bennett, C., et al., 2013. *Nine-year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Final Maps and Results*. [ApJS, 208, 20](#)
- Birkinshaw, M., 1999. *The Sunyaev-Zel'dovich effect*. [PhR, 310, 97](#)
- Galliano, F., et al., 2008. *Stellar Evolutionary Effects on the Abundances of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Supernova-Condensed Dust in Galaxies*. [ApJ, 672, 214](#)
- Hand, N., et al., 2012. *Evidence of Galaxy Cluster Motions with the Kinematic Sunyaev-Zel'dovich Effect*. [PhRvL, 109, 041101](#)
- Hand, N., et al., 2015. *First measurement of the cross-correlation of CMB lensing and galaxy lensing*. [PhRvD, 91, 062001](#)
- Madau, P., & Dickinson, M., 2014. *Cosmic Star-Formation History*. [ARA&A, 52, 415](#)
- Planck Collaboration, 2016. *Planck 2015 results. XXI. The integrated Sachs-Wolfe effect*. [A&A, 594, A21](#)
- Planck Collaboration, 2018. *Planck 2018 results. I. Overview and the cosmological legacy of Planck*. [arXiv:1807.06205](#)
- Planck Collaboration, 2018. *Planck 2018 results. V, CMB power spectra and likelihoods*. [arXiv:1907.12875](#)
- Planck Collaboration, 2018. *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters*. [arXiv:1807.06209](#)
- Planck Collaboration, 2018. *Planck 2018 results. VIII. Gravitational lensing*. [arXiv:1807.06210](#)
- Reichardt, C., 2015. *Observing the Epoch of Reionization with the Cosmic Microwave Background*. [ASSL, 423, 227](#)
-