

COSMOLOGÍA - 1er cuatrimestre 2019

Prof. Esteban Calzetta

Departamento de Física, FCEyN, UBA

Guía 4: Radiación cósmica de fondo

C - Polarización de la radiación cósmica de fondo

1. **Parámetros de Stokes.** Para describir cuantitativamente la polarización de la radiación se utilizan los parámetros de Stokes T, Q, U y V. T está vinculado con la intensidad total, Q con la polarización lineal en los ejes horizontal (\hat{x}) y vertical (\hat{y}), U con la polarización lineal en los ejes a 45° de los anteriores y V con la polarización circular.

Una forma de estimar el parámetro de Stokes U es restar las amplitudes cuadradas del campo eléctrico en las direcciones a $+45^\circ$ y -45° respectivamente. Considerando que la sección eficaz de Thomson para haces polarizados es proporcional a $|\hat{\epsilon} \cdot \hat{\epsilon}'|$, con $\hat{\epsilon}'$ el versor de polarización incidente y $\hat{\epsilon}$ el saliente, la amplitud cuadrada del campo en la dirección $\hat{\epsilon}_i$ es proporcional a

$$\sum_{j=1}^2 |\hat{\epsilon}_i(\hat{n}) \cdot \hat{\epsilon}_j(\hat{n}')|^2, \quad (1)$$

con \hat{n} y \hat{n}' las direcciones de propagación del haz saliente reemitido por el electrón y del haz incidente respectivamente.

De modo que el parámetro U generado por un haz que incide con dirección \hat{n}' es proporcional a la resta entre la cantidad (1) evaluada en la dirección $+45^\circ$ y en la dirección -45° .

- (a) Calcule (módulo factores constantes) el parámetro U correspondiente a un haz incidente con dirección de propagación \hat{n}' .
- (b) Sabemos que la incidencia se produce desde todas las direcciones con una función de distribución $f(\hat{n}')$. Encuentre entonces una expresión para el parámetro U en función de $f(\hat{n}')$.
- (c) Si tuviera que expandir la función de distribución $f(\hat{n}')$ en multipolos, ¿qué término sería el más relevante? ¿Por qué?
- (d) ¿Podría relacionar $f(\hat{n}')$ con alguna cantidad que ya ha estudiado en esta guía? Responda cualitativamente.
- (e) Según la respuesta anterior, ¿qué espera sobre la amplitud del espectro de polarización respecto al espectro de temperatura?

Ayuda. Establezca un sistema de coordenadas fijo al electrón. Asuma que la dirección de propagación saliente es $\hat{n} = \hat{z}$ y escriba la dirección de incidencia en coordenadas primadas convenientes.

2. **Modos E.** Utilizando las salidas del código CAMB, con los parámetros cosmológicos estándar (problema 10 de la guía 4b), estudie la polarización de la radiación cósmica de fondo en función de los siguientes enunciados.

- (a) Grafique el espectro angular de las fluctuaciones para los modos "E" de la polarización. Notará que la amplitud máxima de la polarización es muy pequeña comparada con la amplitud de las anisotropías en la temperatura. Observando el gráfico estime qué porcentaje de la radiación cósmica de fondo se halla polarizada en este modelo.
- (b) Grafique ahora las correlaciones cruzadas entre la temperatura "T" y la polarización "E": TT, EE y TE. Note que, en este caso, podrá obtener valores positivos y negativos. Teniendo en cuenta las amplitudes de la señal en cada caso, discuta si la curva TE puede utilizarse para estudiar la polarización en escalas angulares para las cuales es difícil alcanzar la sensibilidad necesaria para detectar la señal asociada a la curva EE.
- (c) Los espectros TT y EE poseen similitudes y diferencias en términos de la presencia de oscilaciones, su amplitud en relación a la escala angular, las frecuencias de oscilación típicas, la posición de los máximos y mínimos, la escala para la cual la señal se amortigua, etc. Explique brevemente algunas de estas características.

3. **Modos B.** La gran novedad de los modos B es que la correlación C_l^{BB} es nula para perturbaciones escalares. De modo que si observáramos un valor no nulo para dicha correlación estaríamos en condiciones de afirmar la existencia de perturbaciones tensoriales primordiales, i.e., ondas gravitatorias primordiales.

El South Pole Telescope y el experimento POLARBEAR midieron valores no nulos de la correlación BB en el año 2013 y 2014 respectivamente. Sin embargo no concluyeron la existencia de ondas gravitatorias primordiales. ¿Por qué?

A su vez en el año 2014 el experimento BICEP2 también publicó valores no nulos de la correlación BB, pero esta vez favorables a la existencia de ondas gravitatorias primordiales. Luego de un gran desconcierto internacional la comunidad científica entendió que estos resultados no afirmaban la existencia de dichas ondas. ¿Por qué?

Existen al menos 3 grandes efectos que podrían generar o modificar el espectro de los modos B de polarización de la RCF: el efecto de lente débil (*weak lensing*), las ondas gravitatorias primordiales y la reionización. Utilizando los resultados del programa CAMB para el espectro C_l^{BB} responda

- (a) ¿Cuáles son las escalas características correspondientes a los efectos mencionados?. Justifique cualitativamente.
- (b) ¿Es necesaria la presencia de perturbaciones tensoriales iniciales ($r \neq 0$) para obtener una correlación BB no nula? Distinga entre los tres efectos y justifique.
- (c) Muestre los gráficos relevantes que utilizó para resolver. En particular un gráfico de los distintos espectros para un barrido en r (con y sin lente débil). Utilice escala logarítmica.

Ayuda. Usar los parámetros cosmológicos standard establecidos en el problema 10 de la guía 4b. En este ejercicio son importantes las condiciones iniciales (o bien el modelo que las determine, e.g. *Inflación*) a partir de las cuales evolucionan las perturbaciones. Para las escalares podemos utilizar los siguientes valores $A_s = 2.1 \times 10^{-9}$ y $n_s = 0.96$. Para las tensoriales use un espectro invariante de escala, $n_t = 0$, cuya amplitud estará determinada por el parámetro r , *tensor-to-scalar ratio*, que es la razón entre las amplitudes de las fluctuaciones tensoriales y las escalares. Investigue las últimas cotas para r y corra el programa para distintos valores de r por encima y por debajo de esas cotas. A su vez fije la profundidad óptica de reionización, τ , en el valor medido por Planck 2018 y active/desactive la opción de reionización. Además tenga en cuenta activar/desactivar la opción de lente débil.