

UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA

Facultad de Ciencias

Grado de Física

Trabajo Fin de Grado

Oscilaciones Bariónicas Acústicas en Universos con Curvatura

Código del TFG: **FS22-17-FSC**

Tipo de TFG: **Trabajo teórico-práctico general**

Autor: Santiago Sanz Wuhl



Fecha de entrega

Agradecimientos

Incluir los agradecimientos, si procede.

Índice general

Índice general	2
Índice de figuras	3
Índice de tablas	4
Resumen. Palabras clave	5
Abstract. Keywords	6
1. Introducción	7
1.1. El modelo Big Bang Caliente.	7
1.2. Oscilaciones Acústicas de Bariones.	7
1.3. El Fondo Cósmico de Microondas.	8
1.4. La estructura a gran escala del universo.	8
1.5. La escala BAO como regla estándar.	8
1.6. Fundamento teórico	8
1.6.1. Oscilaciones Bariónicas Acústicas	8
1.6.2. Análisis BAO	8
1.6.3. Efecto de la curvatura del universo	9
1.6.4. Estudio de las curvas BAO	9
2. Resultados	10
2.1. Cálculo de observables	10
Conclusiones	12
Conclusions	13
Anexo: Ejemplo para introducir código Matlab	14
Anexo: Ejemplo para introducir código ISE	15

Índice de figuras

2.1. Cálculo de los observables cosmológicos para diferentes cosmologías	11
--	----

Índice de tablas

Resumen

Escriba aquí un resumen de la memoria en castellano que contenga entre 100 y 300 palabras. Las palabras clave serán entre 3 y 6.

Palabras clave: palabra clave 1; palabra clave 2; palabra clave 3; palabra clave 4

Abstract

Insert here the abstract of the report with an extension between 100 and 300 words.

Keywords: keyword1; keyword2; keyword3; keyword4

CAPÍTULO 1

Introducción

1.1. EL MODELO BIG BANG CALIENTE.

Inmediatamente después del Big Bang, el universo contenía una grandísima cantidad de materia y antimateria en un tamaño aproximadamente nulo. Las interacciones entre todas estas partículas daban lugar a unas temperaturas altísimas, que a su vez implicaban una gran emisión de fotones. Conocemos este estado del universo como plasma primordial.

(condiciones iniciales, expansión del universo, composición del plasma primordial, parámetros cosmológicos LCDM)

1.2. OSCILACIONES ACÚSTICAS DE BARIONES.

Las concentraciones de materia implicaban unas intensas interacciones que al equilibrarse con la presión de radiación, daban lugar a la propagación de ondas acústica de manera isótropa por el mencionado plasma, que se propagaba a una velocidad usualmente aproximada según $v = \frac{c}{\sqrt{3}}$.

1.3. EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS.

1.4. LA ESTRUCTURA A GRAN ESCALA DEL UNIVERSO.

1.5. LA ESCALA BAO COMO REGLA ESTÁNDAR.

1.6. FUNDAMENTO TEÓRICO

1.6.1. OSCILACIONES BARIÓNICAS ACÚSTICAS En los primeros cientos de miles de años del universo, éste existía en un estado hiper denso conocido como plasma primordial, formado por (hasta lo que sabemos) materia oscura, bariones y fotones. Debido a la alta concentración de materia del universo temprano, había una fortísima atracción gravitatoria, contrarrestada por la presión de radiación debida al Efecto Thomson.

Las altísimas temperaturas del universo en la época anterior a la recombinación generaban fotones cuya presión de radiación generaba perturbaciones en el plasma que se propaga de forma isotrópica por el espacio. Estas ondas acústicas necesitan por supuesto un medio por el que viajar. Al expandirse el universo disminuyendo así la concentración de materia, llegado cierto punto la distancia entre partículas será demasiado grande como para interactuar, prohibiendo así la expansión de las ondas acústicas y congelándolas en el tiempo. Se conoce el radio de estas ondas como la escala acústica o horizonte del sonido $r_s \approx 150 Mpc$ [?, Eisenstein2004]

1.6.2. ANÁLISIS BAO El análisis de oscilaciones acústicas bariónicas (BAO, por sus siglas en inglés) permite, a través de estudios de gran volumen, analizar y medir r_s . Las oscilaciones BAO no son fáciles de ver a simple vista, pero sabiendo que las galaxias proliferan en esferas de radio r_s , se propone la función de correlación a dos puntos $X_i(r)$ que devuelve la distribución de distancias de galaxias. Esto es, dada una galaxia en un punto \mathbf{r}_i esta distará del resto de galaxias del universo en posiciones $\{\mathbf{r}_j\}$ por una distancia $\{\|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j\|\}$. La densidad $X_i(r)$ recoge la estadística de las distancias a las que se suelen encontrar las galaxias.

Se define $P(k)$ o *galaxy power spectrum* como la transformada de Fourier de $X_i(r)$. Puesto que tenemos un patrón que se repite cada r_s , esta función presenta picos en $\frac{2\pi}{r_s}$.

Al conocer el tamaño *comoving*¹ de estas ondas esféricas congeladas en el tiempo, si conseguimos medir su tamaño actual 'físico' (es decir, considerando la expansión del universo) podremos usar esos resultados para tomar medidas más y más precisas de objetos muy distantes.

¹'Comoving' hace referencia a lo que mediríamos si el universo no se hubiese expandido

La expansión del universo afecta por igual a todas las distancias, incluida la longitud de onda de la luz. Por ello, observaremos una tendencia hacia el rojo de cualquier radiación que midamos, fenómeno conocido como *redshift*. Al conocer el espectro electromagnético de emisión de una galaxia, podemos contrastar la longitud de onda que observamos con la que 'debería ser', es decir, la longitud de onda de emisión.

Definimos así el ya mencionado redshift z

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}} \quad (1.1)$$

Que se podrá usar como una medida del tiempo que ha estado la onda viajando.

1.6.3. EFECTO DE LA CURVATURA DEL UNIVERSO A día de hoy, todos los estudios BAO que se han realizado han asumido un universo sin curvatura. Esto es, aunque el universo presenta curvatura de manera local debido a las concentraciones de masa, el universo es plano de manera asintótica.

1.6.4. ESTUDIO DE LAS CURVAS BAO

CAPÍTULO 2

Resultados

2.1. CÁLCULO DE OBSERVABLES

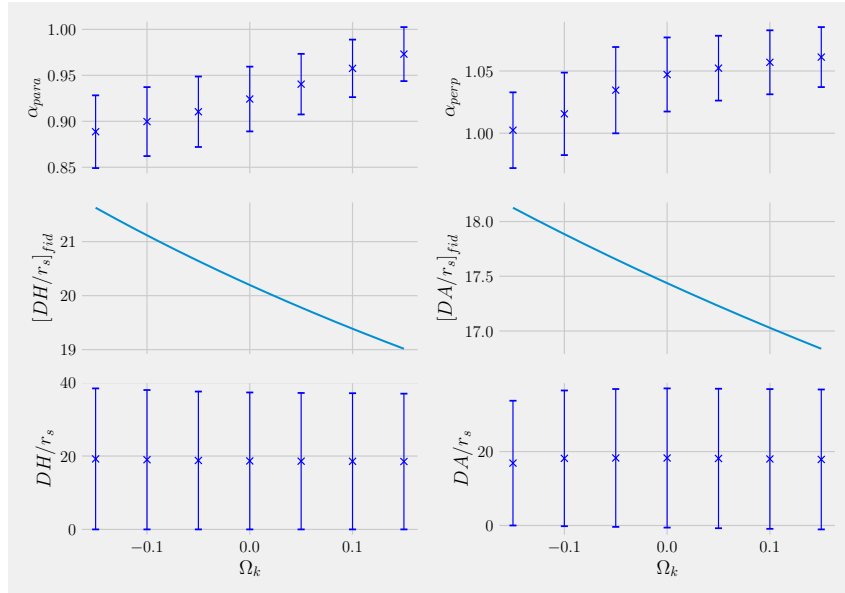


Figura 2.1: Cálculo de los observables cosmológicos para diferentes cosmologías

Conclusiones

En este trabajo ...

Conclusions

In this work ...

Anexo: Ejemplo para introducir código Matlab

```
1 %% 3-D Plots
2 % Three-dimensional plots typically display a surface
3 % defined by a function in two variables,  $z = f(x,y)$  .
4 %%
5 % To evaluate  $z$ , first create a set of  $(x,y)$  points
6 % over the domain of the function using meshgrid.
7     [X,Y] = meshgrid(-2:.2:2);
8     Z = X .* exp(-X.^2 - Y.^2);
9 %%
10 % Then, create a surface plot.
11     surf(X,Y,Z)
12 %%
13 % Both the surf function and its companion mesh display
14 % surfaces in three dimensions. surf displays both the
15 % connecting lines and the faces of the surface in color.
16 % Mesh produces wireframe surfaces that color only the
17 %lines connecting the defining points.
```

Anexo: Ejemplo para introducir código ISE

```
1 library IEEE;
2     use IEEE.STD_LOGIC_1164.ALL;
3     use IEEE.STD_LOGIC_ARITH.ALL;
4     use IEEE.STD_LOGIC_UNSIGNED.ALL;
5 -- Uncomment the following library declaration if
6 -- instantiating any Xilinx primitive in this code.
7 -- library UNISIM;
8 -- use UNISIM.VComponents.all;
9
10 entity counter is
11     Port ( CLOCK : in  STD_LOGIC;
12           DIRECTION : in  STD_LOGIC;
13           COUNT_OUT : out STD_LOGIC_VECTOR (3 downto 0));
14 end counter;
15
16 architecture Behavioral of counter is
17 signal count_int : std_logic_vector(3 downto 0) := "0000";
18 begin
19 process (CLOCK)
20 begin
21     if CLOCK='1' and CLOCK'event then
22         if DIRECTION='1' then
23             count_int <= count_int + 1;
24         else
25             count_int <= count_int - 1;
26         end if;
27     end if;
28 end process;
29 COUNT_OUT <= count_int;
30 end Behavioral;
```