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



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 1.1. El modelo Big Bang Caliente. 1.2. Oscilaciones Acústicas de Bariones. 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 1.6.2. Análisis BAO 1.6.3. Efecto de la curvatura del universo	7 7 8 8 8 8 8 8 8 8 9
1.6.4. Estudio de las curvas BAO	9
	10 10
Conclusiones 1	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.

El modelo actual del origen del universo más aceptado es el del $Big\ Bang$ (en español Gran Explosión), que no es una explosión si no la aparición espontánea de toda la materia del universo en una región de espacio minúscula. Tras un brevísimo intervalo de tiempo, el universo comenzó un corto periodo de rápida expansión conocido como inflación cósmica, periodo en el cual el tamaño del universo aumentó en un factor 10^{27} .

Debido al pequeño tamaño del universo en comparación al tamaño actual, la densidad de matería era mucho mayor y las colisiones entre materia y radiación no permitían la formación estable de núcleos y átomos como los conocemos hoy. Se conoce este periodo de la historia del universo como la época del plasma primordial. Las grandes concentraciones de masa y por tanto las fuertes atracciones gravitatorias generaban altísimas temperaturas que a su vez emitían fotones por radiación de cuerpo negro.

El concepto de expansión del universo apareció cuando Erwin Hubble observó que las mediciones de la longitud de onda de radiación de las galaxias alrededor nuestra estaban todas desplazadas hacia el rojo. Es decir, estaban dilatadas. Esto indica que debido a la expansión del universo la longitud de onda de la radiación observada se habrá dilatado. Introducimos así la Ley de Hubble

$$v = H(t)d (1.1)$$

Que nos relaciona la velocidad de expansión de un punto separado una distancia d del observador, a través de la constante de Hubble $H_0 = 100h \frac{km}{s \cdot Mpc}$, siendo h un factor que permite parametrizar nuestro desconocimiento sobre la H(t).

Introducimos así el concepto redshift

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}}$$
 (1.2)

La expansión del universo viene parametrizada por un factor de forma a(t), de tal forma que si en cierto momento medimos una distancia $a(t_0)\Delta x$, pasado un cierto tiempo Δt la nueva medida de esa misma distancia resultará en $a(t_0 + \Delta t)\Delta x$.

Una parametrización del modelo cosmológico del Big Bang es Λ -Cold Dark Matter (Λ CDM de ahora en adelante).

(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 propagabn 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 unverso 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.

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

$$z = \frac{\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{emitido}}}{\lambda_{\text{emitido}}}$$
 (1.3)

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

^{1&#}x27;, Comoving' hace referencia a lo que mediríamos si el universo no se hubiese expandido

CAPÍTULO 2

Resultados

2.1. CÁLCULO DE OBSERVABLES

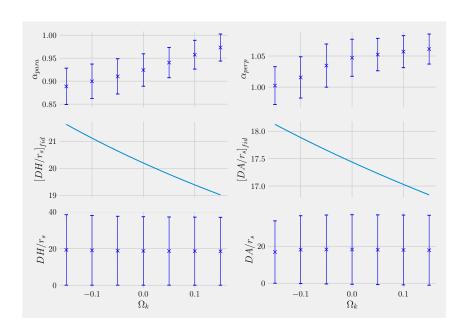


Figura 2.1: Cálculo de los observables cosmológicos para diferentes cosmologías $\,$

Conclusiones

En este trabajo \dots

Conclusions

In this work ...

Anexo: Ejemplo para introducir código Matlab

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

Anexo: Ejemplo para introducir código ISE

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