

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.	9
1.3. El Fondo Cósmico de Microondas.	9
1.4. La estructura a gran escala del universo.	9
1.5. La escala BAO como regla estándar.	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.

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 hace unos 13.6 millones de años 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} .

Durante sus primeros instantes de vida, el universo pasó por varias épocas. El universo comenzó siendo un plasma de fotones, leptones y cuarks, la época del quark. 10^{-6} segundos más tarde, al expandirse el universo y enfriarse, se permitió la combinación entre cuarks para formar protones hemos entrado en la época hadrónica. Todavía el universo es opaco para la radiación electromagnética, debido al corto camino medio que tenían los fotones antes de volver a interactuar con otra partícula a través del efecto Thomson.

Según el universo se sigue expandiendo y las densidades y temperaturas empiezan a bajar, se empieza a permitir la existencia de átomos, como el He^+ y el H . Este periodo termina a los 380.000 años de edad del universo, cuando por fin se terminan de formar los átomos neutros de Hidrógeno, conociendo esta época como la época de recombinación. El nombre recombinación puede confundir. No significa que haya habido un periodo de combinación anterior al que ocurre en 380.000, pero históricamente se teorizó acerca de este momento antes de plantear la existencia del Big Bang.

En cuanto termina la recombinación, los electrones excitados de los átomos debido a la gran densidad fotónica del plasma son permitidos bajar a su estado fundamental, expulsando así una gran cantidad de fotones. Se conoce esta gran emisión como el Fondo Cósmico de Microondas, y es la medida directa más antigua que podemos actualmente observar.

El concepto de expansión del universo aparece cuando Erwin Hubble observa 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

$$v = H_0 d \quad (1.1)$$

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 H_0 . H_0 representa realmente el valor actual de $H(t)$, así como cualquier observable cosmológico A_0 representa el valor actual de $A(t)$.

Introducimos así el concepto *redshift* como variable temporal.

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

La luz necesita tiempo para llegar a su destino, y durante ese tiempo el universo se habrá expandido cierta cantidad. Esa cantidad desplaza la radiación hacia el rojo dándonos una idea de cuánto tiempo ha estado la onda viajando, es decir cuál es la edad del objeto que estamos observando.

La expansión del universo viene parametrizada por un factor de escala $a(t)$, 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 $a(t_0 + \Delta t)\Delta x$ ¹

Es decir, que si consiguiésemos averiguar la expresión de $a(t)$, podríamos determinar la historia del universo. Alexander Friedmann desarrolló en 1922 las ecuaciones de Friedmann en las que define formalmente el ya mencionado parámetro de Hubble $H(t)$

$$H^2(t) := \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G\rho}{3} + \frac{\Lambda c^2}{3} - K\frac{c^2}{a^2} \quad (1.4)$$

$$3\frac{\ddot{a}}{a} = \Lambda c^2 - 4\pi G\left(\rho + \frac{3p}{c^2}\right) \quad (1.5)$$

Siendo G la constante universal de gravitación, ρ la densidad de materia del universo, Λ la constante cosmológica, K la curvatura Gaussiana del universo y p la presión del universo.

Se puede expresar la ecuación (1.4) de una forma más legible, definiendo los parámetros

$$\Omega_m = \frac{8\pi G\rho}{3H^2}, \Omega_\Lambda = \frac{\Lambda c^2}{3H^2}, \Omega_K = -K\frac{c^2}{H^2 a^2} \quad (1.6)$$

Conocidos como los parámetros de densidad, de vacío y de curvatura. Los dos primeros son los que contienen la información de la densidad de los fotones, neutrinos, bariones, materia oscura y energía oscura.

Reescribimos así la ecuación (1.4)

$$1 = \Omega_m + \Omega_\Lambda + \Omega_K \quad (1.7)$$

Que es la ecuación que cumplirá cualquier universo que estudiemos, entendiendo por universo o cosmología los diferentes valores que se le den a los parámetros Ω

¹Más precisamente, $a(t)$ aparece en la métrica de Friedman-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW)

$$ds^2 = -dt^2 + a^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 \right) \quad (1.3)$$

Con estos conceptos podemos relacionar el *redshift* con el factor $a(t)$

$$1 + z = 1 + \frac{\lambda_o - \lambda_e}{\lambda_e} = \frac{a(t_o)}{a(t_e)} \quad (1.8)$$

La ecuación (1.8) nos permite relacionar el factor de escala actual con el que había en el universo en el momento de emisión de la radiación observada, en función del *redshift* que observemos.

Otra relación importante será también la que nos permite calcular el parámetro de Hubble en función de la cosmología que escojamos

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m(1+z)^3 + \Omega_K(1+z)^2 + \Omega_\Lambda} \quad (1.9)$$

A través de la constante de Hubble calculamos también la distancia de Hubble

$$D_H = \frac{c}{H(z)} \quad (1.10)$$

Que actualmente toma un valor de $D_H = 3000h^{-1}\text{Mpc}$. La distancia de Hubble se define como la distancia a partir de la cual la velocidad de expansión del universo relativa al observador es mayor a la velocidad de la luz²

Aquí explico los parámetros que afectan a la expansión del universo y por tanto al redshift y por tanto a las medidas que tomamos.

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 propagaban 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.

²Si sustituimos $v = c$ en (1.1), sustituimos $v = c$ y despejamos la D correspondiente queda exactamente la expresión de D_H

CAPÍTULO 2

Resultados

2.1. CÁLCULO DE OBSERVABLES

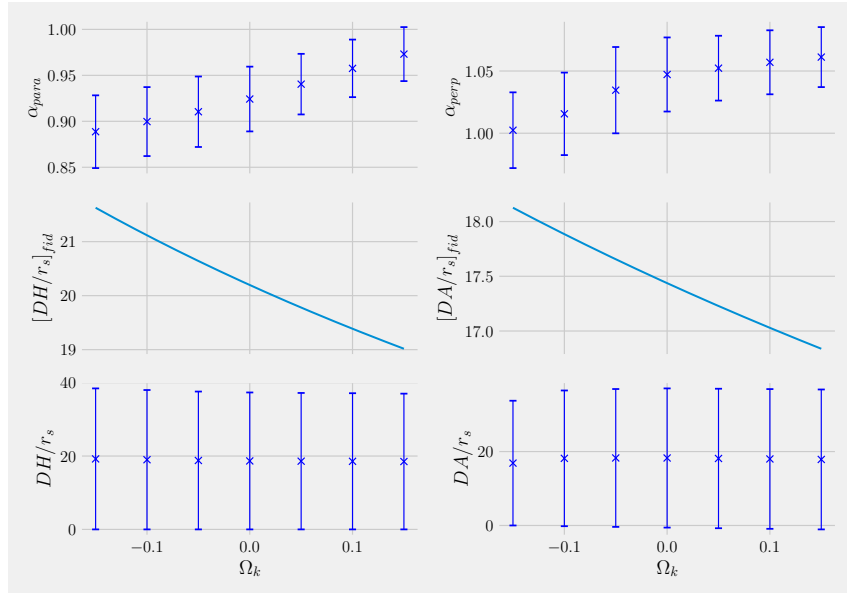


Figura 2.1: Cálculo de los observables cosmológicos para diferentes cosmologías

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;
```