

Baryon acoustic oscillations in the dark matter halos in the SDSS

Research Proposal for a Master Thesis in Physics

Nataly Mateus Londono

Contents

1	General Information	2
2	Abstract	2
3	Introduction	3
4	Theoretical Framework	3
5	Objectives	8
6	Methodology	9
7	Expected Results	10
8	Scientific Impact	10
9	Schedule	10

1 General Information

Information of the Student

Name	Nataly Mateus Londoo
Degree	B.Sc. in Physics, Universidad de Antioquia
Position	Adjunct Professor, Universidad de Antioquia
E-mail	nataly.mateus at udea.edu.co

Information of the Project

Title	Properties of the BAOs from dark matter halos in the SDSS
Field	Cosmology, Astrophysics, Physical Sciences
Advisor 1	Professor Juan Carlos Munoz-Cuartas. Universidad de Antioquia, Colombia.
University	Universidad de Antioquia, Master of Physics program
Time Frame	2 years

2 Abstract

3 Introduction

4 Theoretical Framework

Lo que se puede observar en la actualidad es un universo altamente homogneo e isotrpico a grandes escalas. Adems de la radiacin csmica de fondo conocemos que en una poca ms temprana al desacople de la radiacin y materia las inhomogeneidades encontradas slo se presentan en escalas muy pequeas, fluctuaciones que contrastan con la densidad de fondo. Como consecuencia se han enunciado dos postulados que permiten una mayor simplicidad en el estudio del cosmos, el principio cosmolgico y el postulado de Weyl.

Principio cosmológico: *El universo es isotrópico y homogéneo en grandes escalas.*

No sobra hacer un poco de claridad sobre los trminos usados, homogneo se refiere a que independientemente de donde ubiquemos el sistema de referencia se observar la misma estructura o propiedades del Universo. Por su parte, la isotropa establece que independiente de la direccin en que se realice una observacin se deben nuevamente observar las mismas propiedades del Universo. En otras palabras, se tiene simetra rotacional y traslacional para el sistema de referencia escogido.

En la actualidad dichas caractersticas son observables en escalas de mega parsecs pero ya que el Universo se encuentra en expansin, dicha escala claramente va a depender de la poca csmica en particular.

Adems existe otra premisa importante a tener en cuenta en un mdelo cosmolgico, est es la expansin del Universo, la cul deja fuertes consecuencias en la prediccin de la evolucin de ste, que dependern del contenido de masa y energa total en el Universo. Anteriormente se tena una idea arraigada, que el universo era esttico, muestra de ello es el mdelo cosmolgico propuesto por Einstein donde se inclua una constante tal que se satisficiera dicha condicin. Pero fue gracias a observaciones de galaxias cercanas realizadas por Edwin Hubble, que se concluy que las galaxias en su mayora tienen un corrimiento al rojo, en otras palabras, se estn alejando de nosotros.

Una mtrica que satisface las condiciones de isotropa y homogeneidad

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

es la mtrica Robertson Walker. El trmino $a(t)$ es el factor de escala, describe como la distancia relativa entre dos observadores fundamentales cambia con el tiempo y K es la constante de curvatura en el tiempo actual, define la geometra del Universo.

A grandes escalas la interaccin fundamental de mayor importancia es la gravitacional, por lo que la teora general de la relatividad es una herramienta esencial en el estudio del cosmos. Anteriormente se consideraba vlida la teora newtoniana de la gravitacin pero difiere considerablemente al compararla con la relatividad, puesto que el tiempo y el espacio dejan de ser entes absolutos adems de ser afectados por el contenido de energa y materia presente en el

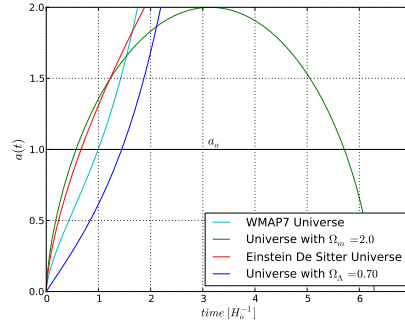


Figure 1: Factor de Escala en funcin del tiempo. La expansin del Universo para diferentes contribuciones a la densidad, se obtiene un Universo cerrado para $\Omega_m = \Omega_o > 1$, los parmetros WMAP7 muestran que el Universo sufre una expansin acelerada.

universo.

En el marco de la teora newtoniana, la ecuación de Poisson ofrece una relación entre la segunda derivada del campo y la densidad de materia que es la fuente de dicho campo

$$\nabla^2 \Phi = 4\pi G \rho$$

a sta se reduce la ecuacin de campo bajo las condiciones de bajas velocidades y campo gravitacional dbil ($\Phi/c^2 \ll 1$). Pero la ecuacin de campo no solo incluye la de Poisson sino adems todo lo relacionado con la dinmica newtoniana. La ecuacin de campo Hilbert-Einstein es entonces

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R - g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (2)$$

sta es una ecuación tensorial de 6 componentes independientes. El primer término de la izquierda corresponde al tensor de Ricci o a segundas derivadas del tensor métrico $g_{\mu\nu}$. En el segundo término se encuentra el escalar de curvatura que define la geometría. En el tercer término Λ es la constante cosmológica, es asociada a la la densidad con la que contribuye el vaco a la densidad total y sera responsable por la expansin acelerada del Universo. Al lado derecho de la ecuacin se encuentra el tensor momentum-energía en la que se incluyen todas las contribuciones de energia y momentum como su nombre lo indica.

Es decir que al lado izquierdo se encuentran los términos que dan cuenta por la geometría del universo mientras que en la derecha los relacionados con la distribución de materia y energia. Por consiguiente se podra afirmar que la geometría es determinada por el contenido de materia-energía del universo, aunque estrictamente hablando el tensor de energía momentum también depende del tensor métrico.

Existen diversas soluciones a la ecuacin de Einstein pero no muchas en forma analtica, por ejemplo Schwarzschild encontr la métrica de un astro estático y con simetra esférica. Otra solución es la métrica de Kerr que corresponde a un astro en rotación con un campo estacionario. Claramente la métrica de Robertson-Walker tambien satisface dichas ecuaciones.

A partir de las ecuaciones de campo de Einstein y la métrica Robertson-Walker es posible proponer modelos cosmológicos que den cuenta por la dinámica observada en el Universo.

Una forma muy usada de las ecuaciones de Friedmann se obtiene de

$$\frac{H^2(z)}{H_o^2} = \Omega_{m,o} (1+z)^3 + \Omega_{r,o} (1+z)^4 + \Omega_{\Lambda,o} + (1 - \Omega_o) (1+z) \quad (3)$$

donde $\Omega_o = \Omega_{m,o} + \Omega_{r,o} + \Omega_{\Lambda,o}$, se ha introducido la relación entre el redshift y el factor de escala $1+z = 1/a$. Se observan las diferentes contribuciones de la densidad al parámetro de Hubble, esto es, la densidad de materia, radiación y vacío. Cada una contribuye dependiendo de la expansión del Universo, aunque la energía del vacío no varía con el redshift.

Inicialmente el Universo estaba dominado por radiación, durante esta época la radiación estaba acoplada con la materia, es decir, la longitud de onda de De Broglie de los electrones es comparable a la longitud de onda de la radiación. Por lo anterior el camino libre medio de los fotones era despreciable, ocasionando que el universo fuera opaco. Durante este acople, la temperatura de la radiación es igual a la de la materia y corresponde a la de un cuerpo negro. Tal como se ve en la gráfica 2, a partir de $z = 3230$ la materia se vuelve la mayor contribución a la densidad del universo y cuando $z = 1100$ la temperatura ha descendido lo suficiente para que la tasa de recombinación sea mayor que la de ionización. En este caso recombinación se refiere a la formación de átomos neutros, lo que permitió el desacople materia-radiación. Pero la última dispersión de la radiación debido a la materia aún puede observarse, corresponde a la radiación cósmica de fondo, la cual como consecuencia de la expansión del universo ha ido enfriándose hasta alcanzar $T = 2.7K$.

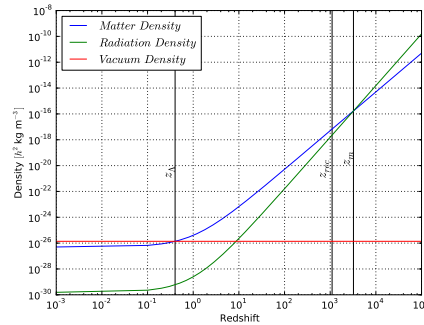


Figure 2: Dependencia en el redshift para Ω_{Λ} , Ω_m y Ω_r . A partir de z_m la densidad de materia domina hasta z_{Λ} donde el término de radiación empieza a dominar. El desacople radiación-materia se da para z_{rec} .

En la actualidad el Universo está dominado por la densidad de vacío, aunque esta es constante puesto que no depende del factor de escala $\rho_{\Lambda} = -c^4 \Lambda / 8\pi G$, en contraposición con la materia que depende como a^{-3} y la radiación como a^{-4} haciendo que dichas contribuciones disminuyan con el tiempo. La constante cosmológica que se observa en esta definición puede ser asociada a una fuerza repulsiva que se opone a la gravedad lo que podrá dar cuenta de la expansión acelerada del universo.

Evolucin de las Perturbaciones de Densidad en Rgimen Newtoniano

Tal como se mencion previamente no podemos detectar radiacin proveniente de una poca previa a la de reionizacin, a causa de la dispersin Compton que mantena acopladas la radiacin y materia. Aunque si se puede observar la distribucin altamente homognea de la materia a este redshift en la radiacin csmica de fondo (Figura ??¹). Dicha radiacin cae en el microondas y da cuenta de variaciones en la densidad de fondo, estas ltimas resultan ser las causantes de la estructura del Universo observada a ms pequeas escalas. Las variaciones en la densidad son fluctuaciones, δ , que fueron incrementando en el transcurso del tiempo, al menos las de nuestro inters. Fue hasta que $\delta \sim 1$ que las fluctuaciones fueron lo suficientemente grandes para ser consideradas objetos individuales, es decir, su movimiento no solo se deba al flujo de Hubble. Lo anterior permite dar una cota superior en redshift a la formacin de galaxias, que se encuentra alrededor de $z \sim 100$, cuando la densidad promedio de estas comparada con la de fondo es aproximadamente 1×10^6 .

Las fluctuaciones iniciales pueden ser tratadas en un rgimen lineal mientras los contrastes en densidad sean $\delta \ll 1$, por lo que para $z < 100$ es una suposicin razonable.

Descripcin Newtoniana

Las fluctuaciones de densidad iniciales tienen una longitud caracterstica mucho menor que la distancia de Hubble, la ltima se define como $d_H \approx ct$. En otras palabras, el tamao de las fluctuaciones es muy pequeo comparada con la escala en la que la curvatura del Universo es significativa, permitiendo que la aproximacin newtoniana sea vlida.

Como se busca estudiar las fluctuaciones de densidad es til expresar la densidad como $\rho = \bar{\rho} + \delta\rho$, donde $\bar{\rho}$ es la densidad de fondo. Adicionalmente es necesario aclarar que la velocidad con la que las partculas se desplazan corresponde a dos contribuciones diferentes, la primera es causada por la expansin del Universo y la otra es la velocidad propia de la partcula. Partiendo de esto, se podra pensar en cambiar el sistema de referencia de las ecuaciones ?? tal que se satisfaga una descripcin lagrangiana, esto es, moverse con la expansin del Universo. Veamos esto en ms detalle, la velocidad en la descripcin euleriana est dada por $\mathbf{u} = a\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{x}\dot{a} = \mathbf{v} + \mathbf{x}\dot{a}$, donde \mathbf{v} es la velocidad peculiar de la partcula y $\mathbf{x}\dot{a}$ es la velocidad de expansin del Universo.

Se puede obtener una ecuacin de onda para las fluctuaciones de densidad

$$\frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} + 2\frac{\dot{a}}{a}\frac{\partial \delta}{\partial t} = 4\pi G\bar{\rho}\delta + \frac{C_s^2}{a^2}\nabla^2 \delta + \frac{2}{3}\frac{\bar{T}}{a^2}\nabla^2 s \quad (4)$$

donde \bar{T} es la temperatura del fondo, C_s es la velocidad del sonido. Al lado derecho se encuentran las fuentes de las fluctuaciones de densidad, como el campo gravitacional, la curvatura dada en trminos de la segunda derivada de las perturbaciones y cambios en la entropa del sistema. En el lado izquierdo se encuentra el parmetro de Hubble que responde por la disipacin de la fluctuacin debido a la expansin del Universo.

¹ Imagen WMAP obtenida en http://lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/current/m_images.cfm

Se propone una solucin a la ecuacin de perturbaciones en trminos de la serie de Fourier

$$\begin{aligned}\delta(x, t) &= \sum_k \delta_k(t) e^{ik \cdot x} \\ s(x, t) &= \sum_k s(t) e^{ik \cdot x}\end{aligned}$$

otro aspecto a tener presente es la independendencia de las funciones $e^{ik \cdot x}$ lo que permite expresar la ecuacin 4 como

$$\frac{d^2 \delta_k(t)}{dt^2} + 2 \frac{\dot{a}}{a} \frac{d\delta_k(t)}{dt} = \left[4\pi G \bar{\rho} - \frac{C_s^2 k^2}{a^2} \right] \delta_k(t) - \frac{2}{3} \frac{\bar{T}}{a^2} k^2 s_k(t) \quad (5)$$

la solucin de est ecuacin nos da los coeficientes de expansin de la serie de Fourier, obteniendo as el comportamiento de las fluctuaciones de densidad durante el tiempo en que el rgimen newtoniano permanece vlido.

Espectro de Potencias

Para realizar un estudio del campo de densidad es necesario realizar un tratamiento estadstico que nos permita conocer las propiedades de ste. En esta direccin, se puede asumir que las fluctuaciones δ siguen una distribucin normal centrada en $\langle \delta \rangle = 0$, lo cual es soportado por escenarios inflacionarios que predicen la formacin de fluctuaciones como un campo gaussiano. Entonces, la probabilidad de que se tenga un campo de densidad, o dicho en otra forma, la probabilidad de que se tenga una distribucin especfica de fluctuaciones de densidad en el espacio de fourier est dada por

$$\mathcal{P}(\delta_{\mathbf{\kappa}}) r_{\mathbf{\kappa}} dr_{\mathbf{\kappa}} d\phi_{\mathbf{\kappa}} = \exp \left[-\frac{r_{\mathbf{\kappa}}^2}{2V_u^{-1}P(\kappa)} \right] \frac{r_{\mathbf{\kappa}}}{V_u^{-1}} \frac{dr_{\mathbf{\kappa}}}{P(\kappa)} \frac{d\phi_{\mathbf{\kappa}}}{2\pi} \quad (6)$$

donde los trminos dependientes de $r_{\mathbf{\kappa}}$ corresponden a la amplitud de las perturbaciones y los de $\phi_{\mathbf{\kappa}}$ a la fase, la ltima vara aleatoriamente entre $[0, 2\pi)$. Esta funcin de densidad de probabilidad conjunta es de utilidad porqu permite independendencia en los trminos $\delta_{\mathbf{\kappa}}$, es decir que es el producto de cada modo

$$\mathcal{P}_{\mathbf{\kappa}}(\delta_{\mathbf{\kappa}_1}, \dots, \delta_{\mathbf{\kappa}_N}) = \prod_{\mathbf{\kappa}} \mathcal{P}_{\mathbf{\kappa}}(\delta_{\mathbf{\kappa}})$$

lo que no sucede al aplicar la transformada inversa de fourier ya que la funcin de probabilidad no es separable en el espacio de coordenadas. El trmino $P(\kappa)$ en 6 es el espectro de potencias, ste es definido en el espacio de fourier y est relacionada con la funcin de correlacin en el espacio real

$$P(k) = 4\pi \int_0^\infty \mathcal{E}(r) \text{sinc}(kr) r^2 dr = V_u \langle |\delta_{\mathbf{\kappa}}|^2 \rangle$$

$\mathcal{E}(r)$ proporciona la correlación entre dos puntos en el espacio. Adicionalmente se ha encontrado que el espectro de potencias esperado por la teoría inflacionaria es $P(\kappa) = k^n$, si n toma el valor de 1 recibe el nombre de espectro Harrison-Zeldovich, es el que mejor resultados proporciona. La isotropía del Universo es tomada en cuenta para el espectro de potencias puesto que se promedia sobre todas las posibles orientaciones del vector κ , adicionalmente debe normalizarse con la cantidad σ_8 que da cuenta por la amplitud de las fluctuaciones a 8Mpc/h. Cuando el campo se asume como gaussiano se puede mostrar que el espectro de potencias contiene toda la información del campo, por lo que para calcularlo se encuentra el espectro de potencias, obteniendo la probabilidad de 6. Al ltimo se le aplica la transformada inversa obteniendo así la distribución del campo en coordenadas espaciales. Dicho campo de densidad inicial es usado para simulaciones cosmológicas o también puede ser tomado de las observaciones realizadas de la radiación cósmica de fondo.

5 Objectives

General Objective

To study the properties of the baryon acoustic oscillations (BAOs), amplitude and width, using as tracers the distribution of the halos in the Sloan Digital Sky Survey and their dependence with the tracer halo population.

Specific Objectives

- Study the physics of BAOs and the bases necessary to understand the expected behaviour of BAOs.
- Use observations and baryonic and dark matter numerical simulations to construct the power spectrum and this way obtain the BAOs.
- Analyse biases and possible corrections to the power spectrum that can affect the baryonic acoustic oscillations obtained.
- Determine in which way the structure scale is related to the amplitude and width of the baryon acoustic oscillations.
- Find if there is a change in the BAOs position with the structure scale and quantify it.
- Find a possible correlation between the BAOs properties and structure formation.
- Write a master thesis.

6 Methodology

The work consists in analysing the behaviour of BAOs in different scenarios, then it is fundamental to find a way to obtain the BAOs either, from simulations or observations. For this reason, it becomes necessary to develop a numerical tool to find such BAOs in any case. But in order to build such a tool it is obviously needed a physical model that can account for BAOs. Using the numerical tool there are going to be done several realizations, this is done seeking to avoid errors associated to cosmic variance and shot noise. Finally after this is done, there is going to be an analysis of the BAOs in simulation(theoretical model) against the BAOs recovered from observations.

A more detailed procedure is shown below.

- **Bibliographical review**

In this first stage it will look for books, reviews and articles related with the physics of BAOs, the different ways to find BAOs through the field density or correlation function, the power spectrum, power spectrum calculation and corrections associated. As well as a search through data base, specially to look for observational data from the SDSS, DR-7 and DR-12 that are going to be used.

- **Construction of models**

Using the information collected in the bibliographical review it will be chosen a model to construct the density field of a baryonic and dark matter simulation, the power spectrum and the corrections to take into account. Equally, for the observational data collected is going to be used an specific model to construct the dark matter halos from which BAOs are going to be found.

- **Model implementation**

In this section it will be coded the models proposed, i.e. , a model to obtain BAOs from N body cosmological simulations and BAOs from certain observations. The code will allow to make several numerical realizations of different baryonic and dark matter simulations and compare them with the BAOs obtained from observations.

- **Analysis and conclusions**

It is necessary to analyse the results obtained in the previous session. One of the most important issue is to characterize the BAOs through this results and show if there are changes in its properties with the cosmological scale, specifically if there is any possible change in the position or width of the BAOs obtained in the power spectrum.

- **Thesis and paper**

The results and conclusions will be written in a master thesis and an article.

7 Expected Results

The expected results when finishing the master studies are

- A code that finds the BAOs of a baryonic and dark matter cosmological simulation, that also includes corrections to the power spectrum that possibly affect the BAOs results.
- Obtain BAOs from several observations, SDSS, DR-7 and DR-12, and conclude what changes appear in the width and position of the BAOs with the structure scale.
- Comparison between the results obtained with baryonic and dark matter cosmological simulations and the BAOs obtained from observations to determine in an optimal way the properties of the BAOs.
- Study the dependence of tracer bias on the BAOs properties measured in the observations.
- A master thesis with the results obtained.
- A submitted article with the results obtained.

8 Scientific Impact

As it was pointed before, there was a time where matter and radiation was coupled, this caused acoustic oscillations due to the competing forces, radiation pressure and the gravity. Then, when decoupling occurred a characteristic scale imprint appeared to various scales. Only the scales of around 150Mpc survived but these ones can be used as standard rulers ?. Specifically these standard rulers are more reliable at high redshifts? than other ones.

A very active investigation field is dark energy (DE), not only is about 70% of the content of energy and matter of the universe but it has not been clearly understood nowadays. A equation of state (EOS) of the dark energy is then a relevant issue to be studied and in general it depends on the redshift, i.e., $w(z)$. Then it becomes necessary to have standard rulers for different stages, including high redshifts. Therefore, the BAOs allows to get tight constraints on the parameters of the DE EOS.

Hence, the relevance of this work is study the properties of the BAOs and this way to provide a better understanding of their behaviour, specifically to observe what are the changes in their position and width with scale structure getting a profound insight in the physics of BAOs.

9 Schedule

Next it is shown a table with the proposed activities scheduled for each term.

Goals	Term I	Term II	Term III	Term IV
Bibliographical review	X			
Construction of models	X	X		
Model implementation		X	X	
Analysis and conclusions			X	
Thesis and paper				X

Table 1: Terms range from 2015-02 for term I, up to 2017-01 for term IV.