

Subestructura en simulaciones de materia oscura

L.F. Martín Alejandro Paredes Sosa

Universidad de Sonora

Director: Dr. Carlos Calcáneo Roldan

Maestría en Ciencias (Física)

Hermosillo, Sonora a Agosto, 2023



*"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"*

Contenido

Introducción

Modelo Cosmológico

Materia y Energía en el
Universo

Evidencia astrofísica de la
Materia Oscura

Características de la Materia
Oscura

Simulaciones cosmológicas

La interacción Dominante
Razón de las Simulaciones
GADGET-4

Halos de Materia Oscura

Cosmología $\Omega_\lambda = 0.691$
 $\Omega_0 = 0.309$

Comparando Cosmologías

Conclusión



Introducción

En este trabajo resumimos los resultados de usar GADGET-4, el cual esta disponible para hacer simulaciones cosmológicas. Mi trabajo principal consistió en aprender a ajustar los modelos necesarios y correr distintos escenarios Cosmológicos para corroborar que las simulaciones pueden servir para discernir el Universo en el que vivimos de una vasta posibilidad de modelos.

Modelo Cosmológico

Existe una gran cantidad de evidencia de que el Universo tiene una componente no luminosa conocida como “materia oscura” y este no es la materia bariónica habitual (protones, neutrones, electrones, etc), sino alguna partícula cuyas propiedades son desconocidas.

Se han probado muchas escalas en la búsqueda de evidencia de materia oscura: desde la escala cosmológica hasta la escala local de galaxias. En el segundo de estos métodos es el mas favorable debido a que es relativamente mas sencillo extraer información dinámica de los sistemas cercanos. Experimentos en la escala cosmológica como el WMAP, la Misión Planck hacen posibles medidas detalladas de muchos parámetros cosmológicos.

La cantidad y composición de materia y energía en el Universo es de fundamental en la cosmología. Podemos descomponer la densidad de materia/energía en tres componentes: la aportada por la radiación (Ω_{rad}), la componente de materia (Ω_M) y una contribución suave (Ω_Λ).

$$\Omega_o \equiv \frac{\rho_{tot}}{\rho_o} = \Omega_{rad} + \Omega_M + \Omega_\Lambda \quad (1)$$

Esta elección trata de reflejar los valores medidos actuales, donde la materia y la radiación son componentes evidentes. La contribución de la radiación a la densidad total de energía en el Universo es pequeña, podemos continuar tomando en cuenta solamente Ω_M y Ω_Λ , donde las observaciones apuntan a que $\Omega_o = 1 \pm 0.1$, $\Omega_M \approx 0.3$ y $\Omega_\Lambda \approx 0.7$.

Las primeras evidencias de la materia oscura, fueron en las mediciones de las velocidades de estrellas cercanas, donde concluyó que había de un 30 % a 50 % mas de materia gravitante de la que es visible. También del estudio de dispersión de velocidades del cúmulo ricos de galaxias requieren de 10 a 100 mas masa para que se encuentren unidas.

Estos ejemplos nos ilustran como la dinámica de estrellas, galaxias y cúmulos sirven como una sonda para detectar el contenido de materia en el Universo.

La mayor parte de la materia del Universo es “materia oscura”, la cual no interactúa con los campos electromagnéticos y solo la podemos detectar por su interacción gravitacional y posiblemente por sus interacciones de fuerza débil. Sus efectos sobre la materia ordinaria son espectaculares dado que los pozos de potencial gravitacional de materia oscura canalizan a los bariones formando los lugares de nacimiento de las galaxias visibles. El estudio de estos lugares nos permite estudiar el crecimiento de estructuras de materia oscura conocidas como “halos”.

El estudio de los halos no es simple y aunque no existe un consenso en la definición de sus propiedades, pero lo definen como un objeto ligado gravitacionalmente. Algunas propiedades con la que caracterizan los halos son la masa, sus velocidades y su tamaño. Sin embargo, cada una de estas cantidades puede referirse a distintos aspectos físicos de la colección de partículas a la que llamamos halos.

Simulaciones Cosmológicas

Las simulaciones cosmológicas son una herramienta esencial para el estudio del Universo. Son el único experimento con el que contamos para reproducir su evolución. Estas permiten un estudio detallado de estructura y nos permite hacer conexiones entre un Universo simple con alto corrimiento al rojo, con un Universo complejo como en la actualidad.

Gracias al desarrollo de códigos y el avance en el hardware de las maquinas modernas, han surgido grandes colaboraciones con la intención de realizar simulaciones cada vez mas grandes. Algunas de estas colaboraciones son la *Millennium Simulation* y la *Eagle Simulation*.

La fuerza que se utiliza en las simulaciones es la gravedad descrita por Newton.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (2)$$

También se suele resolver trabajando el problema con el potencial

$$\nabla \phi(\mathbf{r}) = \mathbf{F} \quad (3)$$

Dado que en el Universo las colisiones son eventos raros, podemos modelar al Universo usando la ecuación de Boltzmann sin colisiones (CBE)

$$\frac{df}{dt} \equiv \frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \Phi}{\partial \mathbf{r}} \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} \quad (4)$$

donde el potencial auto-consistente Φ es la solución a la ecuación de Poisson

$$\nabla^2 \Phi(\mathbf{r}, t) = 4\pi G \int f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t) d\mathbf{v} \quad (5)$$

y $f(\mathbf{r}, \mathbf{v}, t)$ es la densidad de partículas en el espacio fase.

Sin embargo, la dinámica se suele aproximar mediante códigos de N-cuerpos, en el cual supone una interacción entre las partículas dada por la interacción gravitacional clásica por pares de partículas a las que se les agrega un radio de suavizado.

La diferencia entre códigos suele estar en los métodos que usan para realizar los cálculos para el movimiento gravitacional, así como la manera en la que buscan volverlos más rápidos y eficientes.

El código GADGET es uno de los mas utilizados en el estudio de formación de estructura y estudio de materia oscura. Una de las características que separa a GADGET de otros simuladores, es que es un código flexible multi-propósito que no restringe el tipo de simulaciones, sino que da prioridad a la flexibilidad sobre la optimización para casos específicos.

En GADGET-4 se implementaron nuevos métodos numéricos y se introdujeron nuevas herramientas como el FOF y sus variaciones, un generador de condiciones iniciales, entre otras.

El potencial que se resuelve en GADGET-4 es

$$\Phi(\mathbf{x}) = - \sum_{j=1}^N \frac{m_j}{|\mathbf{x}_j - \mathbf{x} + \mathbf{q}_j^*| + |\epsilon(\mathbf{x}_j - \mathbf{x} + \mathbf{q}_j^*)|} + \sum_{j=1}^N m_j \psi(\mathbf{x}_j - \mathbf{x} + \mathbf{q}_j^*) \quad (6)$$

donde la primera parte es el potencial gravitacional de newton con una corrección para considerar el radio de suavizado y el segundo termino en potencial se introduce como una corrección para el suavizado de imágenes distantes. Como GADGET es un simulador diseñado para abarcar una amplia gama de necesidades, se implementaron diversos algoritmos para la forma en la que se realizan los cálculos.

En GADGET-4 se han implementado una diversa cantidad de herramientas con las que podemos estudiar nuestras simulaciones y muchas de estas corren junto a la simulación, lo que permite tener mejores resultados. Algunas de las herramientas que se implementaron son buscadores de grupos, constructores de arboles de fusión, conos de luz, entre otros.

GADGET-4 tiene diversas implementación es de grupos y sub-halos. Se introdujeron versiones propias de FOF y SUBFIND, ademas se creo SUBFIND-HBT (Hierarchically Bound Tracing). FOF busca partículas cercanas, mientras que SUBFIND verifica que las estructuras encontradas estén ligadas gravitacionalmente y SUBFIND-HBT hace el mismo estudio pero en el espacio fase y considera las pasadas afiliaciones.

Halos de Materia Oscura

Con la intención de conocer y diferenciar diferentes cosmologías, en nuestro estudio de los halos de materia oscura, optamos por realizar una variedad de simulaciones de materia oscura. Desde simulaciones con cosmologías de Universos planos ($\Omega = 1$), así como cosmologías de universos con densidades sub-criticas ($\Omega < 1$) y super-criticas ($\Omega > 1$). Las simulaciones que realizamos empezaron en un corrimiento al rojo de $z = 63$ hasta un $z = 0$.

Universo $\Omega_\lambda = 0.691$, $\Omega_0 = 0.309$

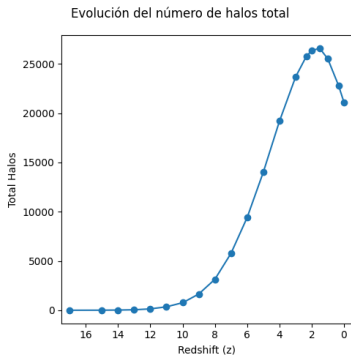


Figura: Se muestra el numero de halos según el redshift y podemos observar como evoluciona el Universo en una cosmología $\Omega_\lambda = 0.691$ y $\Omega_0 = 0.309$.

Esta es la cosmología con la distribicuión de densidades mas aceptada de nuestro Universo. Las estructuras que se forman empiezan a aparecer en $z = 17$, pero a partir de $z = 10$ se ve un incremento significativo en la cantidad de halos hasta alcanzar un máximo 26,584 halos en $z = 1.5$ y finalizando en $z = 0$ con 21,097 halos.

Observamos que la masa media incrementa desde $10^{10.41} M_\odot$ con una desviación de $10^{0.11} M_\odot$ en $z = 15$ hasta $10^{10.75} M_\odot$ con una desviación de $10^{0.49} M_\odot$ en $z = 0$.

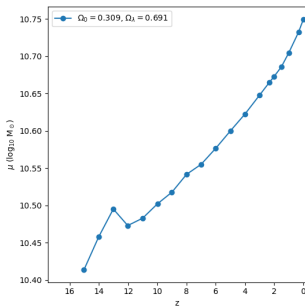


Figura: La evolución de la masa media de los halos de materia oscura en el Universo desde un $z=17$ hasta $z=0$.

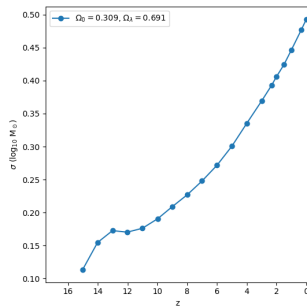


Figura: La evolución de la desviación estándar de la masa de los halos de materia oscura en el Universo desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Vemos el crecimiento del radio medio desde $10^{0.44}$ kpc con una desviación de $10^{0.06}$ kpc en $z = 15$ hasta un radio de $10^{1.47}$ kpc con una desviación de $10^{0.19}$ kpc en $z = 0$.

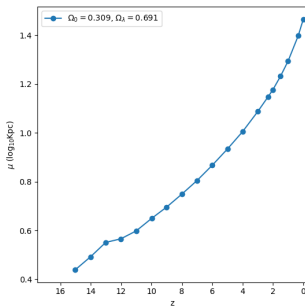


Figura: La evolución del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

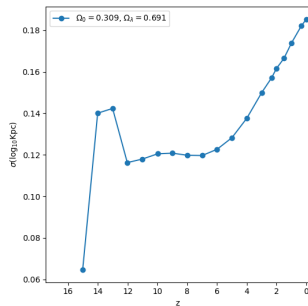


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Cosmología $\Omega_\lambda = 0.691$ $\Omega_0 = 0.309$

Vemos que el radio tiene una media que va desde los 2.45kpc con una desviación de 0.88kpc en $z = 15$ hasta 27.60kpc con una desviación de 15.69kpc en $z = 0$.

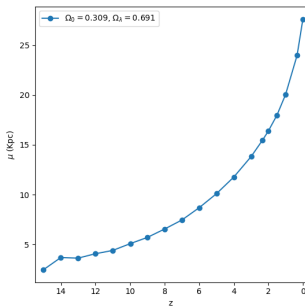


Figura: La evolución del radio donde se alcanza la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

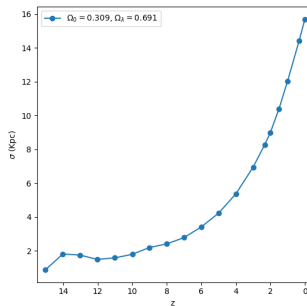


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Lo que podemos es que la velocidad media disminuye rápidamente desde 150.13km/s con una desviación de 26.76km/s en $z = 15$ hasta que alcanza 74.77km/s con una desviación de 33.90km/s en $z = 0$.

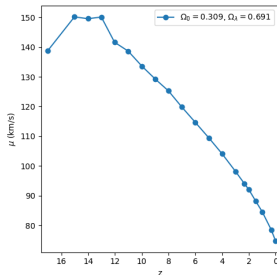


Figura: La evolución de la velocidad máxima circular media de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

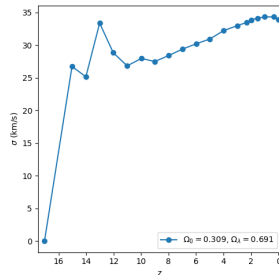


Figura: La evolución de la desviación estándar de la velocidad máxima circular de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Observamos que la dispersión de velocidades media disminuye desde los 85.25km/s con una desviación de 13.09km/s en $z = 15$ a 37.08km/s con una desviación de 18.69km/s en $z = 0$.

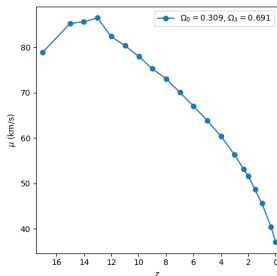


Figura: La evolución de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

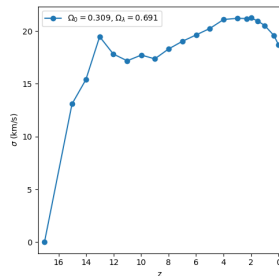


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Comaprando Cosmologías

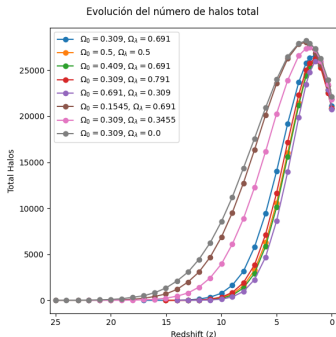


Figura: Se muestra el numero de halos según el redshift y podemos observar como evoluciona el Universo en una cosmología $\Omega_\Lambda = 0.691$ y $\Omega_0 = 0.309$.

Esta es la cosmología con la distribicuión de densidades mas aceptada de nuestro Universo. Las estructuras que se forman empiezan a aparecer en $z = 17$, pero a partir de $z = 10$ se ve un incremento significativo en la cantidad de halos hasta alcanzar un máximo 26,584 halos en $z = 1.5$ y finalizando en $z = 0$ con 21,097 halos.

Observamos que la masa media incrementa desde $10^{10.41} M_{\odot}$ con una desviación de $10^{0.11} M_{\odot}$ en $z = 15$ hasta $10^{10.75} M_{\odot}$ con una desviación de $10^{0.49} M_{\odot}$ en $z = 0$.

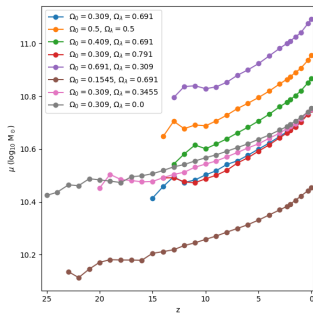


Figura: La evolución de la masa media de los halos de materia oscura en el Universo desde un $z=17$ hasta $z=0$.

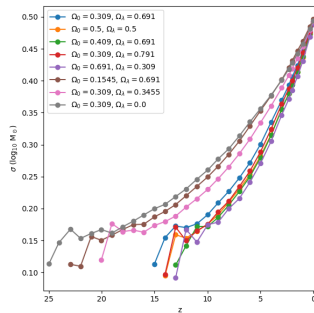


Figura: La evolución de la desviación estándar de la masa de los halos de materia oscura en el Universo desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Comparando Cosmologías

Vemos el crecimiento del radio medio desde $10^{0.44}$ kpc con una desviación de $10^{0.06}$ kpc en $z = 15$ hasta un radio de $10^{1.47}$ kpc con una desviación de $10^{0.19}$ kpc en $z = 0$.

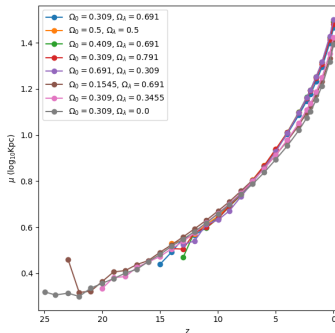


Figura: La evolución del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

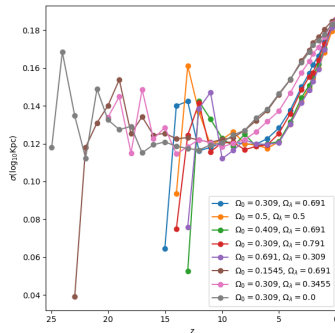


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Vemos que el radio tiene una media que va desde los 2.45kpc con una desviación de 0.88kpc en $z = 15$ hasta 27.60kpc con una desviación de 15.69kpc en $z = 0$.

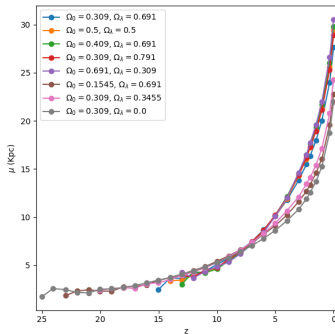


Figura: La evolución del radio donde se alcanza la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

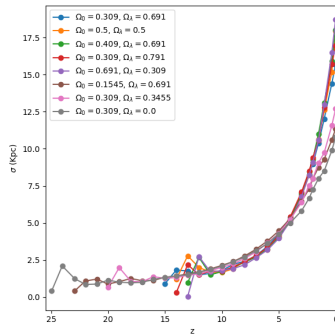


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Lo que podemos es que la velocidad media disminuye rápidamente desde 150.13km/s con una desviación de 26.76km/s en $z = 15$ hasta que alcanza 74.77km/s con una desviación de 33.90km/s en $z = 0$.

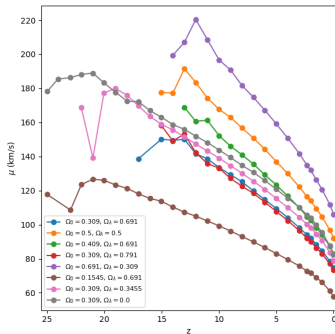


Figura: La evolución de la velocidad máxima circular media de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

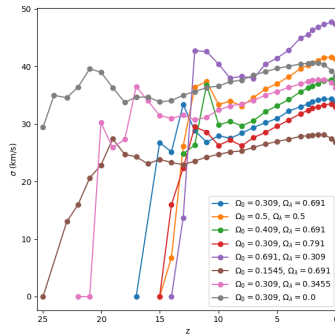


Figura: La evolución de la desviación estándar de la velocidad máxima circular de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Observamos que la dispersión de velocidades media disminuye desde los 85.25km/s con una desviación de 13.09km/s en $z = 15$ a 37.08km/s con una desviación de 18.69km/s en $z = 0$.

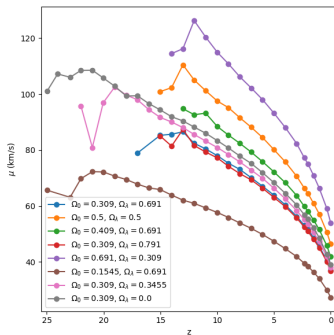


Figura: La evolución de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

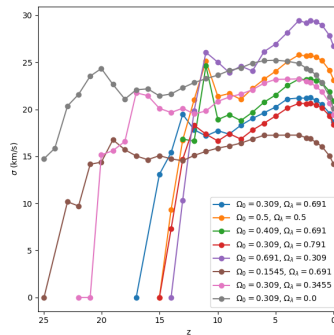


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.



Conclusión