

Subestructura en simulaciones de materia oscura

L.F. Martín Alejandro Paredes Sosa

Universidad de Sonora

Maestría en Ciencias (Física)

Hermosillo, Sonora a Octubre, 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 discriminar 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_0) y una contribución suave (Ω_Λ).

$$\Omega \equiv \frac{\rho_{tot}}{\rho_0} = \Omega_{rad} + \Omega_0 + \Omega_\Lambda \quad (1)$$

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, por lo que podemos continuar tomando en cuenta solamente Ω_M y Ω_Λ , donde las observaciones apuntan a que $\Omega = 1 \pm 0.1$, $\Omega_0 \approx 0.3$ 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 su 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, velocidad circular, dispersión de velocidades del halo, el radio que contiene la mitad de la masa y el radio de la velocidad maxima. 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 implementaciones de buscadores de grupos y sub-halos. Se introdujeron versiones propias de FOF y SUBFIND, además se creó 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 afiliaciones pasadas.

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 fue 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 tienen 16,777,216 partículas en una caja de 50 Mpc y se empezaron con un corrimiento al rojo de $z = 63$ hasta un $z = 0$.

Ω	Ω_0	Ω_λ	Masa por partícula (M_\odot)
$\Omega = 1$	0.309	0.691	6.39×10^8
	0.691	0.309	1.43×10^9
	0.500	0.500	1.03×10^9
$\Omega < 1$	0.309	0.000	6.39×10^8
	0.1545	0.691	3.19×10^8
	0.309	0.3455	6.39×10^8
$\Omega > 1$	0.409	0.691	8.46×10^8
	0.309	0.791	6.39×10^8

Tabla: Se muestra un resumen de las simulaciones que se realizaron y que parámetros fueron lo que se usaron para correr GADGET-4.

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

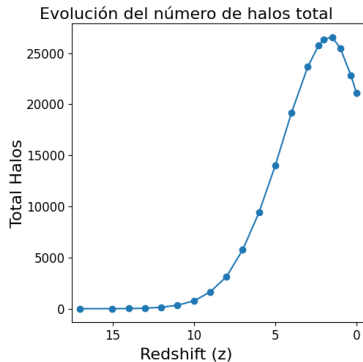


Figura: Se muestra el numero de halos según el redshift y podemos observar como evoluciona el Universo en una cosmología $\Omega_\lambda = 0.691$ y $\Omega_0 = 0.309$.

Esta es la cosmología con la distribución 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 $z = 0$.

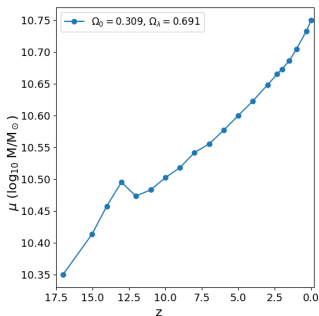


Figura: La evolución de la masa media de los halos de materia oscura en el Universo desde un $z=17$ hasta $z=0$.

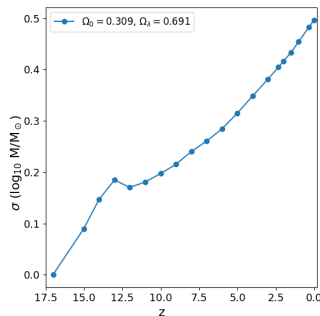


Figura: La evolución de la desviación estándar de la masa de los halos de materia oscura en el Universo desde un $z=17$ hasta $z=0$.

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 $z = 0$.

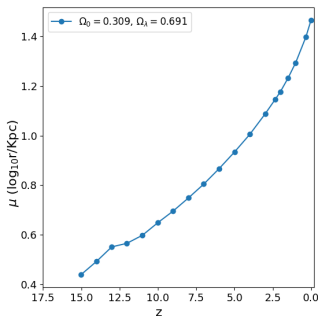


Figura: La evolución del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

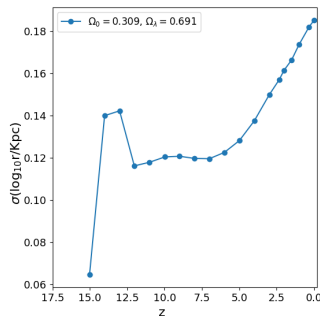


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

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 $z = 0$.

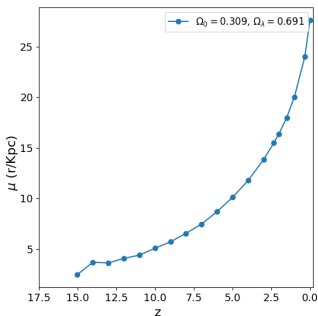


Figura: La evolución del radio donde se alcanza la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

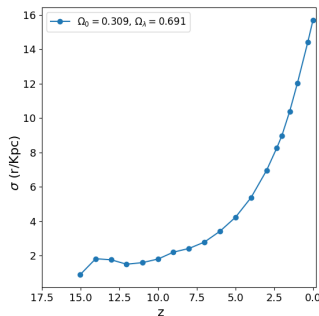


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

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 $z = 0$.

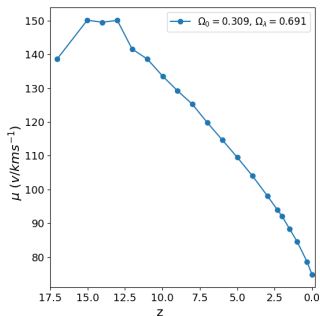


Figura: La evolución de la velocidad máxima circular media de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

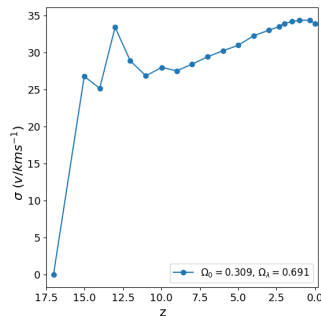


Figura: La evolución de la desviación estándar de la velocidad máxima circular de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

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 $z = 0$.

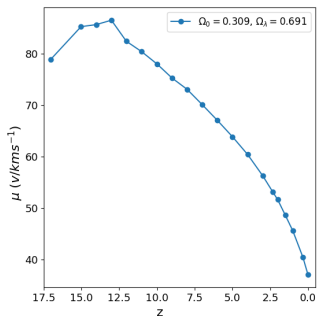


Figura: La evolución de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

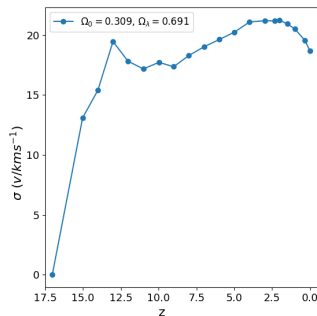


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura desde un $z=17$ hasta $z=0$.

Mapa de Densidad

Se muestra el mapa de densidad durante su evolución. Los redshifts que se muestran son $z = 63$, $z = 10$ y $z = 0$. Se observa evoluciona a lo que llaman *Cosmic Web*.

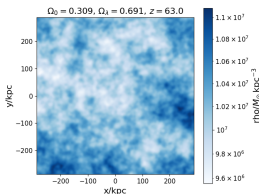


Figura: Mapa de densidad en $z = 63$

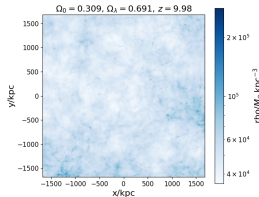


Figura: Mapa de densidad en $z = 10$

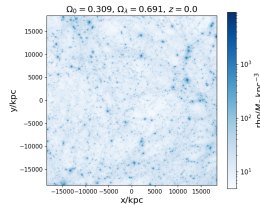


Figura: Mapa de densidad en $z = 0$

Comparando Cosmologías

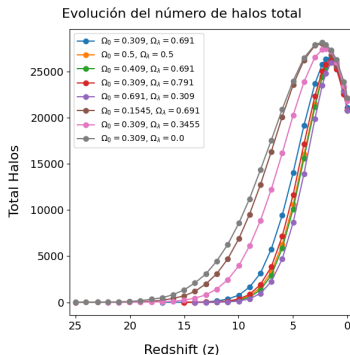


Figura: Se muestra el numero de halos según el redshift y podemos observar como evolucionan diferentes cosmologías

Lo que podemos observar, es que las simulaciones sub-críticas se forma estructura mucho antes que el resto, alrededor de $z = 25$ y forman una mayor cantidad de halos, aproximadamente 28,000 halos.

En el resto de las simulaciones, estas empieza a formar halos en $z = 15$ donde alcanzan un máximo de halos entre 25,900 y 26,300.

Vemos que la masa media en $\Omega_0 = 0.691$ $\Omega_\lambda = 0.309$ tiene las estructuras mas masivas y $\Omega_0 = 0.1545$ $\Omega_\lambda = 0.691$ las menos.

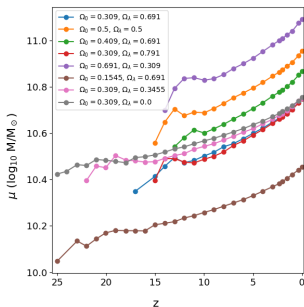


Figura: La evolución de la masa media de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

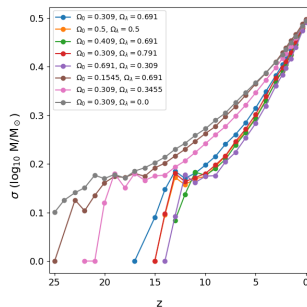


Figura: La evolución de la desviación estándar de la masa de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

En las cosmologías sub-críticas, se ve que la desviación es mayor que en el resto, las cuales tienen un comportamiento similar.

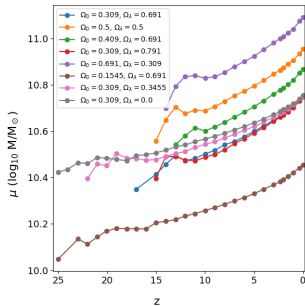


Figura: La evolución de la masa media de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

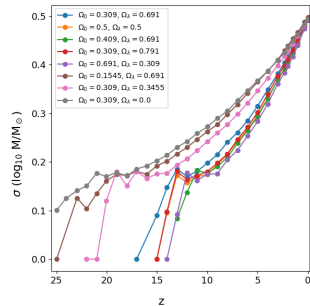


Figura: La evolución de la desviación estándar de la masa de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

Vemos que la media del radio de las diferentes cosmologías tienen un crecimiento similar, donde las cosmologías con un incremento Ω_0 son las de mayor radio y las sub-críticas son las de menor.

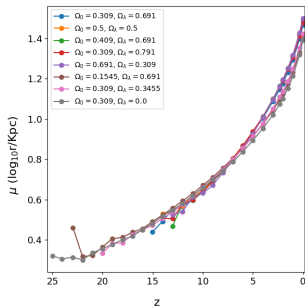


Figura: La evolución del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

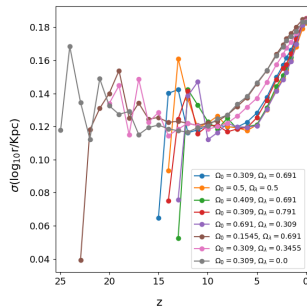


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

Mientras la desviación estándar del radio, muestra que las cosmologías sub-críticas tienen mayor variación en las cosmologías sub-críticas.

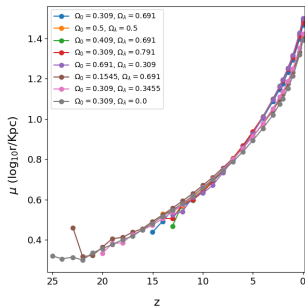


Figura: La evolución del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

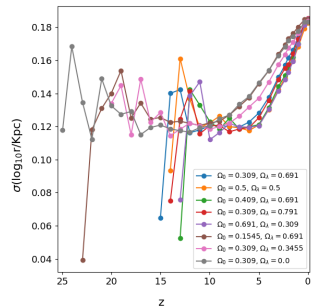


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio que contiene la mitad de la masa de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

Se observa que con el incremento de Ω_0 las estructuras alcanzan un mayor radio medio, mientras en los Universos sub-críticos los radios son lo mas pequeños.

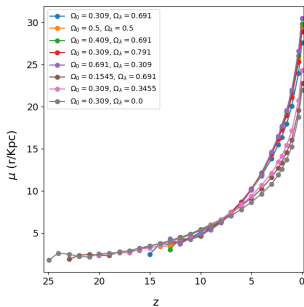


Figura: La evolución del radio donde se alcanza la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

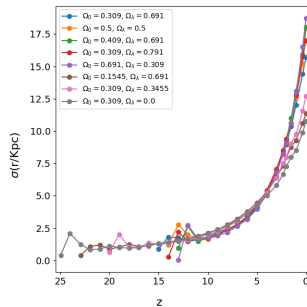


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

Un caso especial que se ve fue que la cosmología con $\Omega_\lambda = 0.791$ tiene un crecimiento similar a cuando Ω_0 crece. En cuanto a su desviación, vemos el mismo comportamiento que la media al incrementar Ω_0

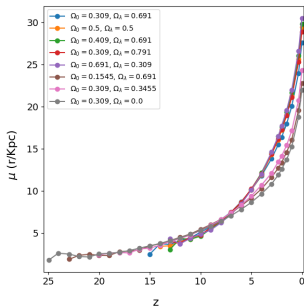


Figura: La evolución del radio donde se alcanza la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

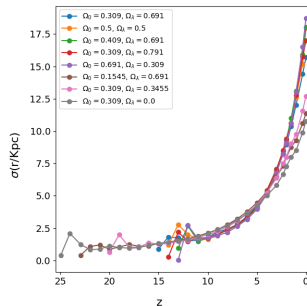


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la velocidad máxima radial de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

Podemos notar que entre mas grande sea el Ω_0 , los halos que se forman alcanzan una mayor velocidad maxima media.

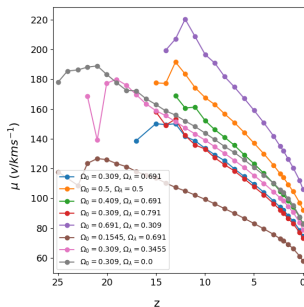


Figura: La evolución de la velocidad máxima circular media de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

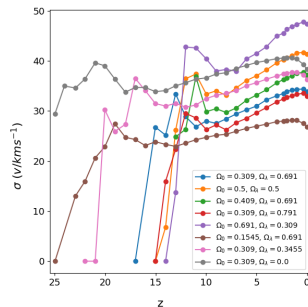


Figura: La evolución de la desviación estándar de la velocidad máxima circular de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

Podemos apreciar que la dispersión de velocidades media se ve afectado con el aumento de Ω_0 de la misma manera que la velocidad maxima.

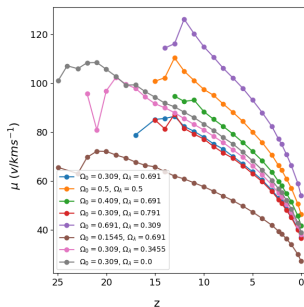


Figura: La evolución de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

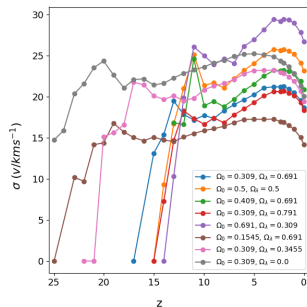


Figura: La evolución de la desviación estándar del radio de la dispersión de velocidades de los halos de materia oscura en diferentes cosmologías.

Comparando Cosmologías

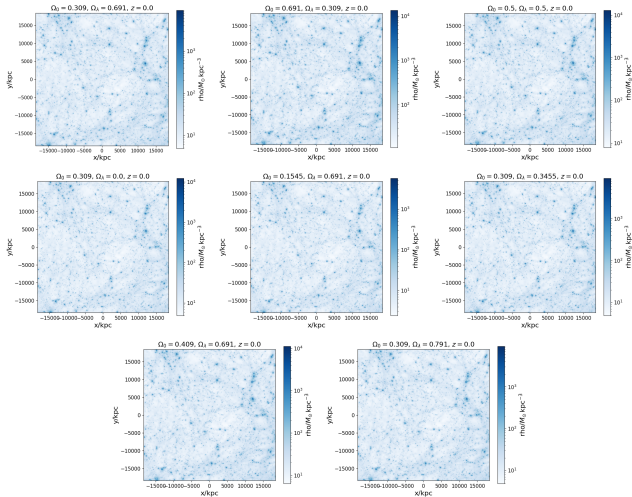


Figura: Mapa de densidad de las diferentes simulaciones. Cosmologías críticas en la parte superior, luego están las sub-críticas y las inferiores son super-críticas.

Conclusión

Podemos ver que las velocidades se ven alteradas por los cambios en Ω_0 , mientras que el tamaño y la masa se ven afectadas por los cambios en Ω_0 y en el tipo de cosmología, ya sea un Universos cerrado, abierto o plano. Pudimos observar que las cosmologías sub-críticas forman estructuras mas pequeñas y menos densas que el resto de las cosmologías.

Con este trabajo podemos inferir como es el comportamiento en la evolución de un Universo según sea sus densidades de materia y energía. Esto nos ayuda a poder inferir que tipo de Universo es en el que vivimos ya que podemos usar las observaciones y compararlas con resultados como estos para inferir las densidades del Universo.