

Simulación de materia oscura colisional con un método Lattice-Boltzmann

Javier Alejandro Acevedo Barroso
201422995

Director: Jaime Ernesto Forero Romero
25 de septiembre de 2018

1. Introduccion

La cosmología moderna infiere que la materia ordinaria (materia bariónica) representa sólo el 5 % de la energía del universo, la energía oscura representa el 68 % y la materia oscura el 27 % [1]. La presencia de la materia oscura se infiere a través de los efectos gravitacionales que produce, pero aún no es claro a que tipo de partícula fundamental por fuera del modelo estándar debe corresponder.

Sin embargo, es posible simular numéricamente la evolución temporal de una distribución arbitraria de diferentes tipos posibles de materia oscura. Por ejemplo, simulaciones numéricas permitieron estudiar candidatos relativistas (calientes) y no relativistas (fríos) de materia oscura y, comparando las estructuras generadas en la simulación con los surveys galácticos disponibles, se concluyó que la materia oscura debía ser no relativista. Tras este éxito inicial, nace el campo de las simulaciones numéricas de materia oscura[2].

Actualmente las simulaciones de materia oscura la modelan como un fluido *no colisional* que interactúa solo gravitacionalmente. Esta aproximación ha sido exitosa explicando el universo a larga escala, sin embargo se observan inconsistencias para el universo a escalas menores. Por ejemplo, observaciones precisas de galaxias enanas muestran distribuciones de materia oscura menos densas de lo que predice la aproximación no colisional [3]. Estos indicios motivan la consideración de la materia oscura colisional. Por otro lado, diferentes modelos de materia oscura en física de partículas tiene límites para la sección transversal de la partícula de materia oscura lo que implica que a nivel fundamental la materia oscura debe ser colisional.

El objetivo principal de esta monografía es dejar atrás la aproximación no colisional para simular materia oscura *colisional* en tres dimensiones espaciales. Para esto utilizaremos el método de Lattice-Boltzmann que discretiza el espacio de fase de la materia oscura y se resuelve numéricamente la ecuación de Boltzmann.

Aunque existen numerosos métodos para simular el espacio de fase como los métodos de N-cuerpos con Particle Mesh o los esquemas de integración directa con Volúmenes Finitos, elegimos el método de Lattice-Boltzmann porque permite introducir de manera explícita el término colisional. Otras ventajas del método es que es lagrangiano, conservativo y completamente reversible[4]. La reversibilidad del algoritmo permite reducir el costo de memoria a cambio de aumentar el costo computacional.

Esta monografía es una continuación directa de la monografía de Sebastián Franco [5] quien resolvió la ecuación de Boltzmann en una dimensión espacial en el caso no colisional.

2. Objetivo General

Simular el espacio de fase de un fluido de materia oscura colisional con un método de Lattice-Boltzmann.

3. Objetivos Específicos

- Implementar una simulación de lattice-Boltzmann en 2D con término colisional.
- Implementar una simulación de lattice-Boltzmann en 3D con término colisional
- Estudiar el comportamiento dinámico de la materia oscura con diferentes aproximaciones para el término colisional.
- Comparar la evolución del espacio de fase para el fluido colisional con su versión no colisional.

4. Metodología

Partiendo de la naturaleza computacional de la monografía, esta se realizará en un computador de escritorio comercial. No se requiere el uso de un cluster ni de recursos computacionales especiales.

La implementación comienza discretizando el espacio de fase y definiendo los límites a usar. El espacio de fase se convierte en un arreglo $2d$ dimensional, donde d es el número de dimensiones espaciales a simular.

Tras la discretización del espacio se procede a inicializar la distribución. Para esto, cada punto del arreglo (i, j) equivale a una velocidad, una posición y una densidad de masa. Acto seguido, se integra respecto a la velocidad para obtener la densidad espacial de masa.

Con la distribución de masa, se resuelve la ecuación de Poisson a través del método de transformada de Fourier para calcular el potencial gravitacional, esto se hace con ayuda de la librería FFTW3 (Fastest Fourier Transform in the West) debido a su fácil uso y alta velocidad.

Una vez se tiene el potencial, se deriva numéricamente para calcular la aceleración y luego se procede a actualizar el espacio de fase. Primero, se calcula el cambio de velocidad en un tiempo dt , luego, usando el operador "entero más cercano" $[.]$, se calcula el traslado en el arreglo del espacio de fase. Por último, se repite el proceso para el cambio de posición.

Adicionalmente, cuando la posición de una partícula sale del arreglo, se considera que una partícula idéntica entra al arreglo con la misma velocidad por el extremo opuesto. Cuando la velocidad de una partícula sale del arreglo se considera que la partícula se perdió.

Luego se procede al cálculo del efecto del término colisional sobre la densidad de número, n , con el siguiente ansatz:

$$\frac{dn}{dt} = \langle v\sigma \rangle (n_{eq}^2 - n^2) \quad (1)$$

Es importante resaltar que en esta simulación no se va a tener en cuenta la expansión del universo, esto permite ignorar el término $3Hn$ de la expresión clásica para materia oscura térmica. Adicionalmente, se simulará sistemas en donde la expansión del universo sea insignificante, como la Vía Láctea.

Utilizando distribuciones de Fermi-Dirac y de Bose-Einstein como distribución de equilibrio, se resuelve para n_{t+dt}

$$n_{t+dt} = n_t + \langle v\sigma \rangle (n_{eq}^2 - n_t^2)dt \quad (2)$$

Empezaremos primero implementando esta lógica para dos dimensiones espaciales para luego pasar a tres dimensiones espaciales.

5. Consideraciones Éticas

Dada la naturaleza computacional de la monografía, el proyecto no debe pasar a estudio por el comité de ética de la Facultad de Ciencias. Guardaremos el comportamiento adecuado al citar adecuadamente trabajo de otras personas. Adicionalmente, todo el software utilizado para la realización de la monografía es de código abierto y está disponible bajo licencia GNU GPL.

6. Cronograma

- Tarea 1: implementar la simulación en 2D sin término colisional.
- Tarea 2: implementar el término colisional en 2D.
- Tarea 3: implementar la simulación en 3D sin término colisional.
- Tarea 4: implementar el término colisional en 3D.

Tareas \ Semanas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
2D No Colisional	X	X	X													
2D Colisional			X	X	X											
3D No Colisional					X	X	X	X								
3D Colisional								X	X	X						
Preparar 30 %							X	X								
Escribir Documento							X	X			X	X	X	X	X	
Revisión Bibliográfica															X	X

- Tarea 5: preparar y presentar el avance del 30 %.
- Tarea 6: escribir el documento de monografía.
- Tarea 7: revisión bibliográfica.

7. Personas Conocedoras del Tema

- Jaime Ernesto Forero Romero (Universidad de los Andes)
- Carlos Andrés Flórez Bustos (Universidad de los Andes)
- Juan Carlos Sanabria Arenas (Universidad de los Andes)

Referencias

- [1] P. A. R. Ade et al. Planck 2013 results. I. Overview of products and scientific results. *Astron. Astrophys.*, 571:A1, 2014.
- [2] Gianfranco Bertone and Dan Hooper. A History of Dark Matter. *Submitted to: Rev. Mod. Phys.*, 2016.
- [3] Sean Tulin, Hai-Bo Yu, and Kathryn M. Zurek. Beyond Collisionless Dark Matter: Particle Physics Dynamics for Dark Matter Halo Structure. *Phys. Rev.*, D87(11):115007, 2013.
- [4] Philip Mocz and Sauro Succi. Integer lattice dynamics for Vlasov–Poisson. *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, 465(3):3154–3162, 2017.

- [5] Sebastián Franco Ulloa. Simulaciones de un fluido débilmente auto-interactuante con métodos de lattice-boltzmann, 5 2017.

Firma del Director

Firma del Estudiante