

# Modelo de Distribución de estrellas, Enanas Blancas, estrellas de Neutrones y Agujeros negros para la Via lactea mediante simulación de Monte Carlo

Diego Montero Bustos,<sup>1</sup>★

<sup>1</sup>*Departamento de Física, Universidad Federico Santa María//*

7 November 2023

## ABSTRACT

En este paper se simuló la vía lactea mediante el IMF y un SFR constante de modo de crear un modelo estadístico de los objetos del universo. El objetivo fue obtener las distribuciones con respecto a la cantidad total de objetos de los Black H, White D y Neutron S. Los resultados fueron de una cantidad de White Dwarfs 14.67589 billones, Neutron Stars 0.32188 billones, Black Holes 0.12353 billones. Además por propiedades de los agujeros negros y enanas blancas concluimos que el modelo es concordante con la vía láctea.

## 1 INTRODUCTION

Nuestra galaxia, La vía láctea, consta de una gran diversidad de objetos astronómicos. Entre ellos, los más comunes son las estrellas. No obstante, estas también pasan por un proceso de cambio a lo largo del tiempo donde cambian su morfología, convirtiéndose así en 3 posibles grandes categorías de remanentes, White-Dwarfs, Black-Holes y Neutron Stars. Sabemos que en la vía láctea hay al rededor de 100 billones de estrellas, con aproximadamente 10 billones de White-Dwarfs, 1 billón de Neutron Stars y 100 millones de Agujeros negros, estos nos hace preguntarnos si existe alguna relación estadística entre estas cantidades. Para ello existen las simulaciones de Monte Carlo que son una herramienta matemática que ayuda a prever los posibles desenlaces de eventos inciertos estadísticamente hablando. Estos cálculos se realizan mediante programas de computadora que analizan datos pasados y predicen resultados futuros basados en decisiones específicas. Al utilizar este método en datos astronómicos, los cuales pueden contener grandes espacios muestrales, podemos de alguna forma llegar a cantidades invariantes ante la existencia de una gran colección de datos. Algunas variables importantes a la hora de realizar una simulación de este estilo, es la Initial Mass Function (IMF). Esta corresponde a una función que describe la distribución de estrellas según masa a medida que se está produciendo formación estelar. En el presente paper fue utilizada la distribución de Kroupa [1] la cuál corresponde

$$\xi(m) \propto m^{-\alpha_i} = m^{\gamma_i},$$

$$\alpha_0 = 0.3 \pm 0.7, \quad 0.01 \leq \frac{m}{M_\odot} < 0.08$$

$$\alpha_1 = 1.3 \pm 0.5, \quad 0.08 \leq \frac{m}{M_\odot} < 0.50$$

$$\alpha_2 = 2.3 \pm 0.3, \quad 0.5 \leq \frac{m}{M_\odot} < 1.00$$

$$\alpha_3 = 2.3 \pm 0.7, \quad 1 \leq \frac{m}{M_\odot}$$

En este paper asumiremos que las estrellas que no pertenecen a la Main Sequence corresponden a Remanentes, por tanto será importante definir el tiempo que una estrella con una cierta masa permanece en la secuencia principal. Llamamos a este tiempo  $TMS$  y

corresponde a

$$TMS = \frac{10^{10} \text{ yr}}{(M/M_\odot)^{2.5}}$$

Por simplicidad diremos que una estrella es remanente si su tiempo de vida supera  $TMS$ . Para las estrellas que superan aquella cantidad, serán Remanentes y por ello separamos a ellas según masa. En particular utilizamos que las White Dwarf poseen masas  $M_{WD} < 8M_\odot$ , las neutron Stars entre 8 y 20 masas solares mientras que los Black Holes poseen más de 20 masas solares.

Otra variable importante es el Initial to Final Mass relation (IFMR) el cuál nos informa acerca de la masa al final de la vida de una estrella con respecto a su masa inicial. Para el caso de las WD se tiene que

$$M_{\text{final}} = (0.109 \pm 0.007)M_{\text{initial}} + 0.394 \pm 0.025M_\odot$$

Para el caso de las estrellas de neutrones se separa en varias posibilidades según en rango de masas. Matematicamente

$$M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) = 2.24 + 0.508(M_{\text{ZAMS}} - 14.75)$$

$$+ 0.125(M_{\text{ZAMS}} - 14.75)^2 + 0.0110(M_{\text{ZAMS}} - 14.75)^3$$

$$9 \leq M_{\text{ZAMS}} \leq 13M_\odot$$

$$M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) = 0.123 + 0.112M_{\text{ZAMS}}$$

$$13 < M_{\text{ZAMS}} < 15M_\odot,$$

$$M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) = 0.996 + 0.0384M_{\text{ZAMS}}$$

$$15 \leq M_{\text{ZAMS}} < 17.8M_\odot.$$

$$M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) = -0.020 + 0.10M_{\text{ZAMS}}$$

$$17.8 < M_{\text{ZAMS}} < 18.5M_\odot.$$

Dónde  $M_{\text{ZAMS}}$  denota la masa del edad cero de la secuencia principal. Para los agujeros negros se separa en 2 ramas, la primera de ellas es para agujeros negros de baja masa dónde el estos tienen 2 contribuciones principales las cuales se muestran a continuación

$$M_{\text{BH, core}}(M_{\text{ZAMS}}) = -2.049 + 0.4140M_{\text{ZAMS}}$$

$$15 \leq M_{\text{ZAMS}} \leq 40M_\odot.$$

$$\begin{aligned}
M_{\text{BH,all}}(M_{\text{ZAMS}}) &= 15.52 - 0.3294(M_{\text{ZAMS}} - 25.97) \\
&\quad - 0.02121(M_{\text{ZAMS}} - 25.97)^2 \\
&\quad + 0.003120(M_{\text{ZAMS}} - 25.97)^3 \\
15 &\leq M_{\text{ZAMS}} \leq 40M_{\odot}
\end{aligned}$$

En estas regiones aparecen 2 masas contribuyente pues estos Remanentes poseen una envoltura que contribuye con la implosión. De manera más general podemos definir

$$\begin{aligned}
M_{\text{BH}}(M_{\text{ZAMS}}; f_{\text{ej}}) &= f_{\text{ej}} M_{\text{BH, core}}(M_{\text{ZAMS}}) \\
&\quad + (1 - f_{\text{ej}}) M_{\text{BH, all}}(M_{\text{ZAMS}}).
\end{aligned}$$

Por otro lado para estrellas de la segunda rama ( más masivas) ya no hay practicamente contribución de envoltura y por tanto la masa final quedaría descrita por

$$\begin{aligned}
M_{\text{BH, core}}(M_{\text{ZAMS}}) &= 5.697 + 7.8598 \times 10^8 (M_{\text{ZAMS}})^{-4.858} \\
45 &\leq M_{\text{ZAMS}} \leq 120M_{\odot}
\end{aligned}$$

Con esta información el objetivo es obtener un aproximado de la cantidad de cada uno de los objetos antes mencionados en la vía láctea, extrapolando un millón de datos a 1 billón.

## 2 METHODS

Los datos utilizados son principalmente Masas estelares en el rango desde 0.01 hasta 100 masas solares con tiempos de vida entre 0 y 10 Myr. Estos datos se generan aleatoriamente mediante la librería random de python bajo la restricción de que las masas deben seguir la distribución del IMF y los tiempos deben generarse a SFR constante. Aquí nos encontramos con un problema con las constantes de proporcionalidad de los IMF de kroupa, para resolverlo impusimos continuidad y normalización, obteniendo así coeficientes de proporcionalidad completamente determinados. La cantidad de estrellas que se generan aleatoriamente corresponden a 1 millón, las cuales cuentan con valores de masas subdivididos en 300 mil intervalos mientras que en el tiempo en 200 intervalos. Se generaron, mediante las restricciones descritas, pares ordenados (masa, tiempo) para el millón de estrellas. Luego mediante la función TMS se extrajo los pares ordenados que satisfacían estar fuera de la Main Sequence de modo de poder clasificarlos en WD, NS y BH. Mediante los rangos de masa se separaron esos sub-datos de modo de utilizar las funciones descritas en introducción para calcular las masas finales de cada objeto. Luego se tomaron nuevamente los datos separados de WD, BH y NS de modo de establecer la razón con las estrellas aún en la secuencia principal.

Como criterios de evaluación de la elección de las masas y tiempos se realizaron histogramas para probar que las estrellas seguían realmente la distribución del IMF y SFR constante.

### 2.1 Results

El primero de los resultados es la comparación entre la curva de IMF y la generación de masas descritas mediante un histograma normalizado. Como la curva del IMF se encontraba normalizada, se espera que el histograma normalizado coincida con la curva. Esto se puede ver en la figura 1. Además como se generaron valores de tiempos aleatorios a SFR constante, también era necesario obtener si realmente la distribución del histograma es coincidente con un SFR constante. Esto también es evidente en figura 2. Luego mediante el TMS se obtuvo la separación de los datos en aquellos que aún

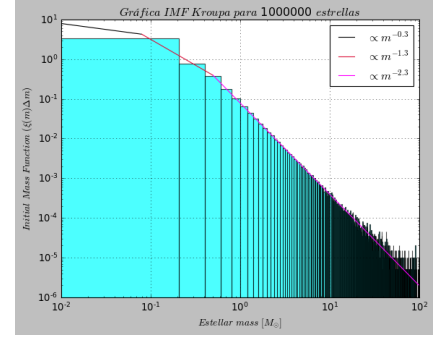


Figure 1. Initial Mass function e histograma para los datos generados

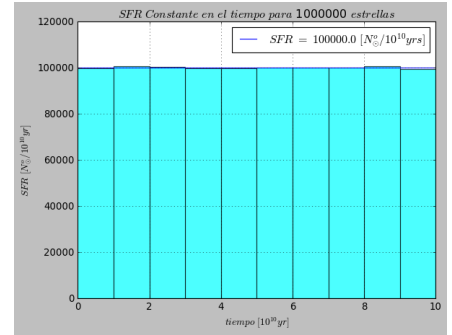


Figure 2. Histograma como registro de la conservación del SFR

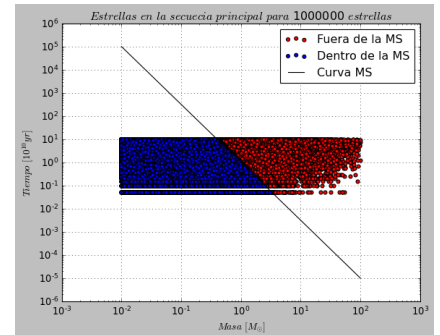
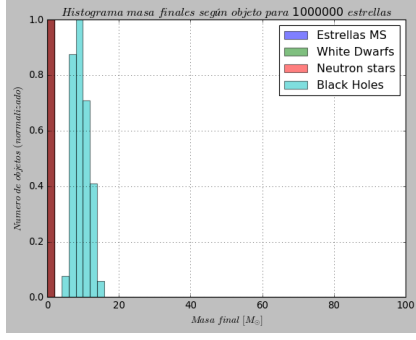
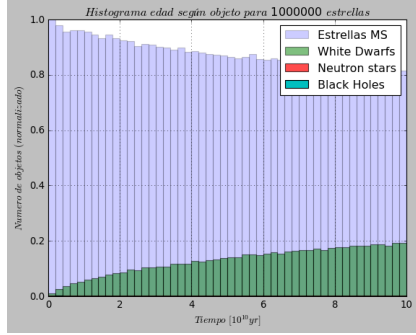


Figure 3. Objetos en la secuencia principal y fuera de ella

pertenecen a la Main sequence (en Azul) y aquellos que son remanentes (en Rojo). Vea figura 3 Podría resultar incómoda la existencia de líneas distribuidas uniformemente en los datos. Esto es debido a la utilización de la escala logarítmica que permite observar el intervalo de subdivisión de las masas y tiempos. Con estos datos separamos mediante lo mostrado en Introducción, obteniendo así la gráfica de figura 4, la que representa las masas de los objetos en las etapas más evolucionadas de su vida. Aquí puede observar que los agujeros negros son aquellos que mantienen su distribución de masa en mayor cantidad. Los demás objetos colapsan hacia masas lo suficientemente pequeñas. Esto es concordante con lo que sucede realmente con los objetos como las enanas blancas, mientras que también los agujeros negros satisfacen una realidad física de mantener compacta influencia másica. Finalmente En figura 5 se muestra como se distribuyen las estrellas en el tiempo. Puede ver que las enanas Blancas siguen una curva creciente, concordante con que cada vez una mayor cantidad de estrellas llegan a esa fase. Las enanas blancas son alta-



**Figure 4.** Distribución de masas finales para los objetos generados



**Figure 5.** Cantidad de objetos según tipo de objeto por intervalo de tiempo

mente estables y por ello es su incremento monótono. Finalmente calculando la razón respectivo de la cantidad de objetos remanentes por cada estrella de la secuencia principal y además agregando que la cantidad total de estrellas en 1 billón, se concluye que la cantidad de White Dwarfs es 14.67589 billones, Neutron Stars 0.32188 billones, Black Holes 0.12353 billones.

### 3 CONCLUSIONS

En conclusión el modelo es concordante con las fases posteriores de las remanentes, concordando así con la preservación de la masa de los agujeros negros y la reducción de la masa en las enanas blancas. Además las enanas blancas siguen una distribución monótona concordante con su estabilidad y aumento de estrellas que salen de la secuencia principal. Finalmente vemos que los valores de los números de objetos astronómicos son similares a los planteados de manera aproximativa mente en la introducción. Concluimos que la distribución de objetos está directamente ligado a un fenómeno estadístico.