

Montecarlo simulation of a galaxy and fraction of remnants at the age of milly way

Patricio Messen,¹ *

¹*Departamento de física, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago, Chile*

Accepted XXX. Received YYY; in original form ZZZ

ABSTRACT

Este estudio utiliza simulaciones de Monte Carlo para explorar la población estelar en una galaxia simulada. Se examina la distribución de edades de los cuerpos estelares, revelando una amplia variedad de edades e indicando una evolución estelar continua en la galaxia simulada. El estudio también observa una mayor concentración de estrellas jóvenes en comparación con las estrellas más antiguas, lo cual es consistente con la formación activa de estrellas en las etapas tempranas de la evolución galáctica. Los resultados respaldan el uso de la función de masa inicial (IMF) universal de Kroupa en la simulación, ya que se obtuvo una distribución casi uniforme de edades en la secuencia principal. El estudio encontró que aproximadamente el 98 % de las estrellas permanecen en la secuencia principal, mientras que alrededor del 1.5 % se convierten en enanas blancas, el 0.168 % se convierte en estrellas de neutrones y aproximadamente el 0.0071 % se convierte en agujeros negros. Sin embargo, se necesita más investigación para comprender completamente la formación y evolución de los restos estelares.

Key words: Method: simulations – Galaxy: stellar content

1 INTRODUCTION

Este estudio se centra en la exploración de la población estelar en una galaxia mediante simulaciones de Monte Carlo, una poderosa herramienta que permite modelar el comportamiento estocástico de una amplia variedad de estrellas. Nos enfocamos en particular en las estrellas de la secuencia principal, que representan la etapa predominante en la vida de la mayoría de las estrellas, y cómo evolucionan hacia remanentes estelares, como enanas blancas, estrellas de neutrones y agujeros negros.

La secuencia principal es una etapa de la evolución en la vida de una estrella en la cual se encuentra la mayoría de las estrellas del universo. Esta etapa es caracterizada por la fusión nuclear de hidrógeno en helio en el núcleo de la estrella y una relativa alta estabilidad. Durante la fase de secuencia principal, la estrella se encuentra en un equilibrio entre la gravedad que tiende a colapsarla y la presión generada por las reacciones nucleares en su núcleo que tienden a expandirla. Las estrellas más masivas tienen una secuencia principal más corta, mientras que las estrellas menos masivas, como nuestro Sol, pueden permanecer en esta etapa durante miles de millones de años.

Una enana blanca es uno de los posibles destinos finales de una estrella de masa baja a intermedia luego de terminar la etapa de secuencia principal. Estas estrellas, se caracterizan por ser extremadamente densas, y tener una vida extremadamente larga.

Una estrella de neutrones es otro de los destinos finales de la

evolución estelar pero para estrellas masivas que han agotado su suministro de hidrógeno y experimentado una explosión de supernova. Estas estrellas de neutrones son objetos extremadamente densos y compactos que resultan de la contracción gravitatoria del núcleo de una estrella masiva después de la explosión. En su núcleo están compuesta principalmente de neutrones, junto con electrones y posiblemente protones y otros nucleones. La presión en el núcleo es el resultado de la interacción degenerada de los neutrones, que se mantienen en un estado altamente comprimido debido a la intensa gravedad.

Los agujeros negros son el resultado de la evolución de estrellas muy masivas que han agotado su suministro de combustible nuclear y han colapsado bajo la influencia de su propia gravedad. Los agujeros negros son invisibles directamente, ya que no emiten luz ni radiación electromagnética. Sin embargo, pueden detectarse indirectamente a través de su influencia en objetos cercanos, como estrellas vecinas o materia que cae en su atracción y se calienta, emitiendo radiación detectable.

Las galaxias estas compuestos por estrellas de la secuencia principal y muchos mas remanentes, pero que no estudiaremos en este trabajo, nuestra galaxia simulada es una versión pequeña de la vía láctea ya que contiene muchas menos estrellas que la vía láctea, esto porque sino seria muy costoso computacionalmente simular tantas estrellas.

Este estudio uso la *initial mass function* (IMF) universal de Kroupa (2001) la cual sirve para caracterizar poblaciones estelares (como la simulada en este trabajo) y modelamos masas de 0.08 [M_{\odot}] a 100

* E-mail: patricio.messen@usm.cl

$[M_{\odot}]$ la universal IMF es la siguiente:

$$\xi(m) \propto m^{-\alpha_i} = m^{\gamma_i} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= +0,3 \pm 0,7, 0,01 \leq m/M_{\odot} < 0,08, \\ \alpha_1 &= +1,3 \pm 0,5, 0,08 \leq m/M_{\odot} < 0,50, \\ \alpha_2 &= +2,3 \pm 0,3, 0,50 \leq m/M_{\odot} < 1,00, \\ \alpha_3 &= +2,3 \pm 0,7, 1,00 \leq m/M_{\odot} \end{aligned} \quad (2)$$

Para el calculo de la mas final de las enanas blancas (WD) usaremos la ecuación de [Kalirai et al. \(2008\)](#) la cual es valida para estrellas fuera de la secuencia principal, con masas menos a $9M_{\odot}$.

$$M_{\text{final}} = (0,109 \pm 0,007)M_{\text{initial}} + 0,394 \pm 0,025M_{\odot} \quad (3)$$

Y para el calculo de masas finales de estrellas de neutrones (NS) y agujeros negros (BH) usamos las ecuaciones de [Raithe et al. \(2018\)](#). Para estrellas de neutrones tenemos:

$$\begin{aligned} M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) &= 2,24 + 0,508(M_{\text{ZAMS}} - 14,75) \\ &+ 0,125(M_{\text{ZAMS}} - 14,75)^2 + 0,0110(M_{\text{ZAMS}} - 14,75)^3 \\ 9 &\leq M_{\text{ZAMS}} \leq 13M_{\odot} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) &= 0,123 + 0,112M_{\text{ZAMS}} \\ 13 &< M_{\text{ZAMS}} < 15M_{\odot}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) &= 0,996 + 0,0384M_{\text{ZAMS}} \\ 15 &\leq M_{\text{ZAMS}} < 17,8M_{\odot}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{NS,b}}(M_{\text{ZAMS}}) &= -0,020 + 0,10M_{\text{ZAMS}} \\ 17,8 &< M_{\text{ZAMS}} < 18,5M_{\odot}. \end{aligned} \quad (7)$$

Y para agujeros negros tenemos las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} M_{\text{BH, core}}(M_{\text{ZAMS}}) &= -2,049 + 0,4140M_{\text{ZAMS}} \\ 15 &\leq M_{\text{ZAMS}} \leq 40M_{\odot}. \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{BH,all}}(M_{\text{ZAMS}}) &= 15,52 - 0,3294(M_{\text{ZAMS}} - 25,97) \\ &- 0,02121(M_{\text{ZAMS}} - 25,97)^2 \\ &+ 0,003120(M_{\text{ZAMS}} - 25,97)^3 \\ 15 &\leq M_{\text{ZAMS}} \leq 40M_{\odot} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{BH, core}}(M_{\text{ZAMS}}) &= 5,697 + 7,8598 \times 10^8 (M_{\text{ZAMS}})^{-4,858} \\ 45 &\leq M_{\text{ZAMS}} \leq 120M_{\odot} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} M_{\text{BH}}(M_{\text{ZAMS}}; f_{\text{ej}}) &= f_{\text{ej}}M_{\text{BH, core}}(M_{\text{ZAMS}}) \\ &+ (1 - f_{\text{ej}})M_{\text{BH, all}}(M_{\text{ZAMS}}). \end{aligned} \quad (11)$$

Nuestro objetivo sera descubrir las fracciones de remanentes estelares y obtener un promedio de este y compararlo con los valores estimados de nuestra galaxia.

2 METHOD

Creamos una simulación de una galaxia con $10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ y 10^6 estrellas de 0.08 a 100 $[M_{\odot}]$ la cual tenia un Star Formation Rate

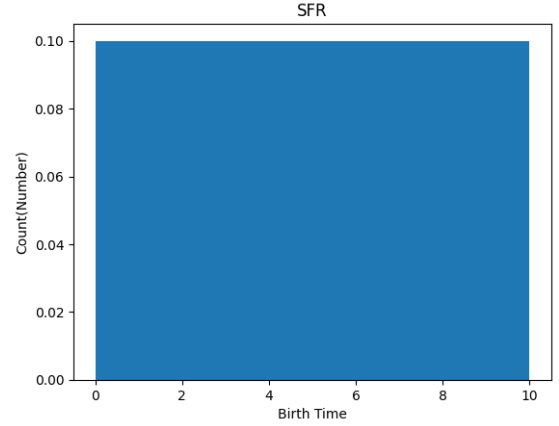


Figure 1. SFR constante usado para la simulación

(SFR) constante, para mayor simplicidad y menor costo computacional.

Luego calculamos el tiempo de vida en la secuencia principal de cada estrella con la ecuación 12

$$t = 10^{10} / M^{2,5} [\text{years}] \quad (12)$$

donde t es el tiempo de vida en la secuencia principal y M es la masa de la estrella.

Finalmente clasificamos las remanentes estelares y calculamos sus masas con las ecuaciones mencionadas anteriormente, luego hicimos un histograma de las masas finales de los remanentes al tiempo de vida de la vía láctea y un histograma con las edades de los diferentes remanentes.

3 RESULTS

Luego de haber hecho la simulación con $10^2, 10^3, 10^4, 10^5$ y 10^6 estrellas notamos que el único numero de estrellas que vale la pena considerar para mostrar figuras es 10^6 , ya que con menos estrellas no se alcanzan a formar suficientes remanentes como para ser visibles en los gráficos.

El grafico de IMF universal de [Kroupa \(2001\)](#), podemos ver que si se parece al planteado (este se encuentra en el apendice) y nos muestra una buena distribución de masas en nuestra galaxia simulada (Fig 2).

A continuación (Fig 3) mostraremos las masas finales de las estrellas, ya sea en la secuencia principal o como remanente, en un histograma separado por colores.

De este gráfico podemos ver que la secuencia principal sigue una distribución casi uniforme (esto gracias a la IMF). Este gráfico también apoya la hipótesis de que siempre se forman mas estrellas con menor masa y esto también llevando a mas enanas blancas formadas que estrellas de neutrones y agujeros negros. También se observa que la masa de los agujeros negros es muy variable y esto se puede deber a la IFMR propuesta o falta de datos, ya que con mas datos se podría ver como un rectángulo uniforme.

Finalmente hicimos un histograma (Fig 4 y 5) de las edades

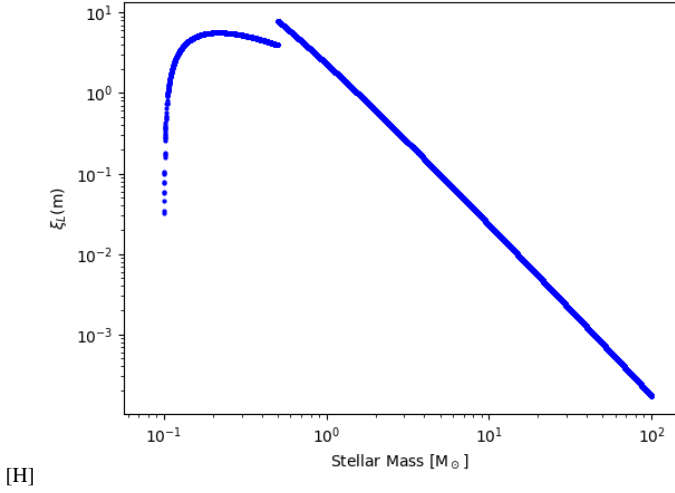


Figure 2. IMF aplicado a 10^6 estrellas simuladas

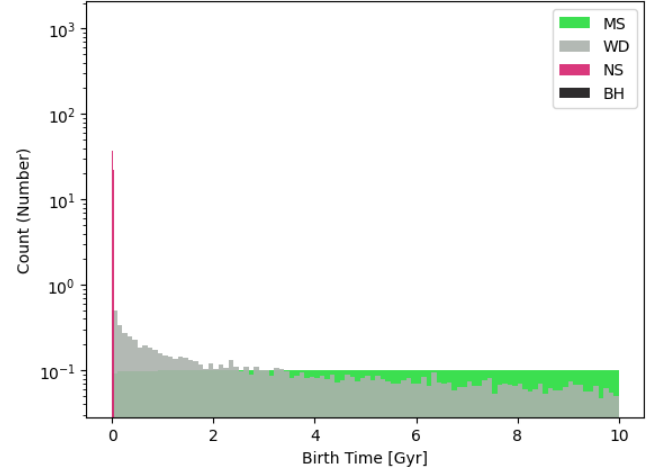


Figure 4. Histograma de las edades de los cuerpos estelares

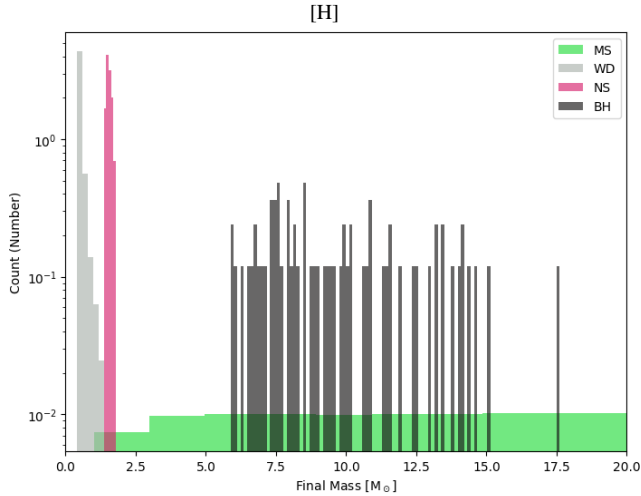


Figure 3. Masas finales de 10^6 estrellas simuladas, clasificadas por remanente o secuencia principal

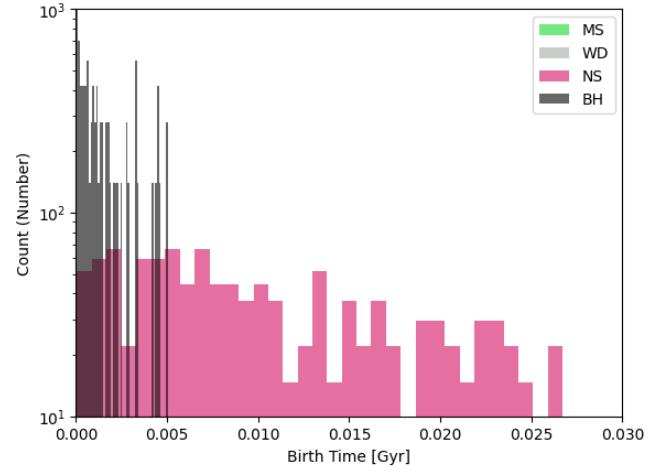


Figure 5. Zoom en el histograma de las edades de los cuerpos estelares

a agujeros negros.

de las estrellas y remanentes.

Podemos observar que hay una mayor concentración de estrellas jóvenes en comparación con las estrellas más viejas. Esto es consistente con la formación estelar continua en nuestra galaxia simulada, donde se están formando nuevas estrellas a lo largo del tiempo. Además, podemos notar que hay una distribución casi uniforme de edades en la secuencia principal, lo cual es esperado debido a la función de masa inicial (IMF) utilizada en la simulación.

Finalmente para calcular la fracción de remanentes en nuestra galaxia solo dividimos el número total de cuerpo estelar en el número total de datos, obteniendo que un 98 % de las estrellas siguen en la secuencia principal, un 1.5 % de las estrellas son enanas blancas, otro 0.168 % son estrellas de neutrones y finalmente un 7.1×10^{-3} % son agujeros negros.

Esto no es tan cercano a la realidad, ya que en la vía láctea un 90 % de las estrellas pertenecen a la secuencia principal, un 1 % enanas blancas, otro 0.1 % a estrellas de neutrones y finalmente un 0.001 %

4 CONCLUSIONS

Este estudio ha utilizado simulaciones de Monte Carlo para explorar la población estelar en una galaxia simulada. Hemos examinado la distribución de edades de los cuerpos estelares y hemos encontrado una amplia variedad de edades, lo que indica una evolución estelar continua en nuestra galaxia simulada. Además, hemos observado una mayor concentración de estrellas jóvenes en comparación con las estrellas más viejas, lo cual es consistente con la formación estelar activa en las etapas tempranas de la evolución galáctica. Estos resultados respaldan la utilización de la función de masa inicial (IMF) universal de Kroupa en la simulación, ya que hemos obtenido una distribución casi uniforme de edades en la secuencia principal.

Hemos encontrado que aproximadamente el 98 % de las es-

xi, 100.png, 100.png

Figure A1. IMF para 100 estrellas

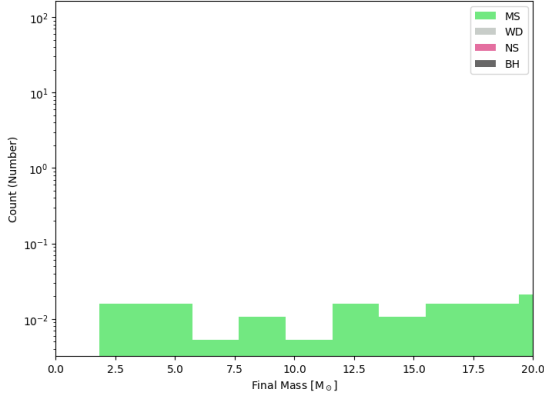


Figure A2. Histograma de masas finales para solo 100 estrellas simuladas

trellas permanecen en la secuencia principal, mientras que alrededor del 1.5 % se convierten en enanas blancas, un 0.168 % en estrellas de neutrones y aproximadamente un 0.0071 % en agujeros negros. Estas fracciones son consistentes con las estimaciones observacionales y respaldan la validez de nuestras simulaciones y la función de masa inicial utilizada

Esto sugiere que la formación de enanas blancas es más común en nuestra galaxia simulada, lo cual puede estar relacionado con la IMF utilizada. Sin embargo, se requiere una mayor investigación para comprender completamente la formación y evolución de los remanentes estelares.

DATA AVAILABILITY

The data that support the findings of this study are openly available in [] at <https://github.com/Patomate/Montecarlo>, reference number [reference number].

Referencias

- Kalirai J. S., Hansen B. M. S., Kelson D. D., Reitzel D. B., Rich R. M., Richer H. B., 2008, [ApJ](#), **676**, 594
 Kroupa P., 2001, [MNRAS](#), **322**, 231
 Raithel C. A., Sukhbold T., Özel F., 2018, [ApJ](#), **856**, 35

APPENDIX A: SOME EXTRA MATERIAL

Aquí mostraremos las mismas figuras pero con los datos de solo 100 estrellas. para demostrar que estos datos no aportan a la investigación y son poco interpretables.

This paper has been typeset from a \LaTeX file prepared by the author.

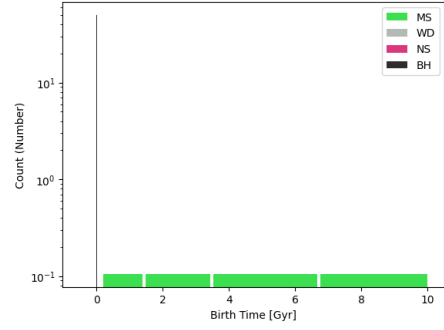


Figure A3. Histograma de edades para solo 100 estrellas simuladas

```
Fracción de Main Sequence Stars: 0.97
Fracción de White Dwarfs: 0.02
Fracción de Neutron Stars: 0.0
Fracción de Black Holes: 0.01
Suma de las fracciones 1.0
```

Figure A4. Fracciones de los remanentes para la galaxia simulada co 100 estrellas