



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ciencias

DETECTABILIDAD DE RADIOPULSARES EN GALAXIAS ENANAS

Ovidio Fernando García Oliva

Asesorado por el Dr. Eduardo Adolfo Rubio Herrera y el M. Phil. Edgar Anibal

Cifuentes Anléu

Guatemala, marzo de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

DETECTABILIDAD DE RADIOPULSARES EN GALAXIAS ENANAS

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

OVIDIO FERNANDO GARCÍA OLIVA

ASESORADO POR EL DR. EDUARDO ADOLFO RUBIO HERRERA Y EL
M. PHIL. EDGAR ANIBAL CIFUENTES ANLÉU

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

LICENCIADO EN FÍSICA APLICADA

GUATEMALA, MARZO DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
VOCAL V	Br. Sergio Alejandro Donis Soto
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

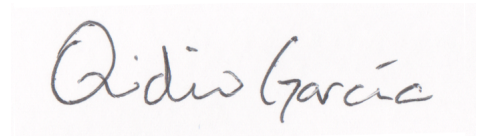
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Walter Giovanni Álvarez Marroquín
EXAMINADOR	Ing. Rodolfo Samayoa Dardón
EXAMINADOR	Ing. Otto Miguel Hurtarte Hernández
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DETECTABILIDAD DE RADIOPULSARES EN GALAXIAS ENANAS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ciencias, con fecha 28 de noviembre de 2012.

A handwritten signature in black ink on a light-colored background. The signature reads "Ovidio García" in a cursive script.

Ovidio Fernando García Oliva

Guatemala, 06 de febrero del 2014

Ing. Edwin Bracamonte
DIRECTOR, ESCUELA DE CIENCIAS
FACULTAD DE INGENIERIA
USAC, Ciudad

Estimado Ingeniero Bracamonte:

Me dirijo a usted para informarle que he realizado la revisión al protocolo de trabajo de graduación: "**Detectabilidad de Radiopulsares en galaxias enanas**", presentada por el estudiante **Ovidio Fernando García Oliva**, con carné No. 2006-11440; y considerando que cumple con los objetivos de la carrera de Licenciatura en Física Aplicada, le doy mi aprobación, como asesor de dicho trabajo.

Agradeciendo su amable atención, me suscribo de usted muy atentamente,



Dr. Eduardo A. Rubio Herrera

A S E S O R

colegiado 12409

c.c. archivo



Facultad de Ingeniería

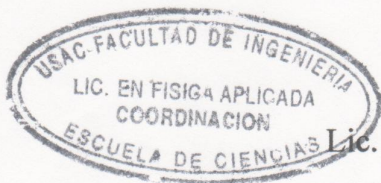
Guatemala, 06 de febrero del 2014


Ing. Edwin Bracamonte
DIRECTOR, ESCUELA DE CIENCIAS
FACULTAD DE INGENIERIA
USAC, Ciudad

Estimado Ingeniero Bracamonte:

Me dirijo a usted para informarle que he realizado la revisión al protocolo de trabajo de graduación: “**Detectabilidad de Radiopulsares en galaxias enanas**”, presentada por el estudiante **Ovidio Fernando García Oliva**, con carné No. 2006-11440; y considerando que cumple con los objetivos de la carrera de Licenciatura en Física Aplicada, le doy mi aprobación, como asesor de dicho trabajo.

Agradeciendo su amable atención, me suscribo de usted muy atentamente,




Lic. Edgar Anibal Cifuentes Anleu
A S E S O R



Facultad de Ingeniería

Ref.Depto.Fis.0015-2014
Guatemala, 06 de febrero del 2014

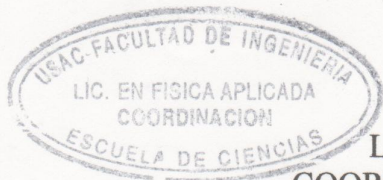
Ing. Edwin Bracamonte
DIRECTOR, ESCUELA DE CIENCIAS
FACULTAD DE INGENIERIA
USAC, Ciudad

Estimado Ingeniero Bracamonte:

Me dirijo a usted para informarle que he realizado la revisión al protocolo de trabajo de graduación: **“Detectabilidad de Radiopulsares en galaxias enanas”**, presentada por el estudiante **Ovidio Fernando García Oliva**, con carné No. 2006-11440; y considerando que cumple con los objetivos de la carrera de Licenciatura en Física Aplicada, le doy mi aprobación.

Agradeciendo su amable atención, me suscribo de usted muy atentamente,

“ID Y ENSEÑAD A TODOS”




Lic. Ricardo Enrique Contreras Folgar
COORDINADOR, LIC. EN FISICA APLICADA
DEPARTAMENTO DE FISICA
FACULTAD DE INGENIERIA

c.c. archivo





El Director de la Escuela de Ciencias de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, después de conocer el dictamen de los asesores, con el visto bueno del Coordinador de la Carrera de Licenciatura en Física Aplicada al trabajo de graduación del estudiante **Ovidio Fernando García Oliva**, titulado "DETECTABILIDAD DE RADIOPULSARES EN GALAXIAS ENANAS", procede a la autorización del mismo.


Ing. Edwin Adalberto Bracamonte Orozco
Director Escuela de Ciencias



Guatemala, 20 de marzo de 2014

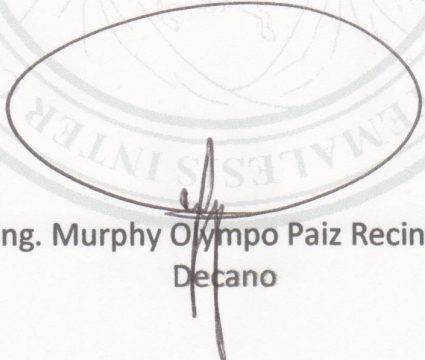
EABOP/scvs



DTG. 136.2014

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ciencias, al Trabajo de Graduación titulado: **DETECTABILIDAD DE RADIOPULSADORES EN GALAXIAS ENANAS**, presentado por el estudiante universitario **Ovidio Fernando García Oliva**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinós
Decano

Guatemala, 21 de marzo de 2014

/gdech



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	III
LISTA DE SÍMBOLOS	V
GLOSARIO	VII
RESUMEN	IX
OBJETIVOS	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. ANTECEDENTES	1
1.1. Galaxias y clasificación galáctica	1
1.1.1. Galaxias esferoidales enanas	2
1.2. Estrellas de neutrones y pulsares	3
1.2.1. Radiopulsares y sus características	5
1.3. Métodos e instrumentos para la detección de radiopulsares	9
1.3.1. Instrumentos: radiotelescopios	9
1.3.2. Detectabilidad de pulsares	12
1.3.3. Detección por periodicidad (análisis de Fourier)	12
1.3.4. Detección por pulsos individuales	13
1.4. Modelos y simulación numérica	13
1.4.1. Simulación	13
1.4.2. Método Monte Carlo (MMC)	14
1.4.3. MMC en poblaciones de radiopulsares	15
1.4.4. MMC en las características individuales de los pulsares	17
2. MODELO DE POBLACIÓN DE RADIOPULSARES	19
2.1. Cantidad de SNeII producidas en una galaxia	19
2.1.1. Masa y metalicidad en la producción de SNeII	19

2.1.2.	Función de masa inicial (IMF)	21
2.1.3.	Historia de formación estelar (SFH)	25
2.1.4.	Factor de emisión	27
2.1.5.	Evolución temporal de un radiopulsar	29
2.2.	Población de radiopulsares en la Vía Láctea	30
3.	POBLACIÓN DE RADIOPULSARES EN LA GALAXIA ESFEROIDAL ENANA DE SCULPTOR	35
4.	DETECTABILIDAD DE RADIOPULSARES EN LA SdSph	41
	CONCLUSIONES	51
	RECOMENDACIONES	53
	BIBLIOGRAFÍA	55
	APÉNDICE	63

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Galaxia esferoidal enana de Sculptor (SdSph)	3
2.	Nebulosa del Cangrejo (M 1)	5
3.	Pulsos sobrepuestos de la radiofuente Vela	8
4.	Gran Telescopio Milimétrico (GTM)	10
5.	Diagrama de flujo	16
6.	Esquema de un pulsar como un dipolo magnético	28
7.	Diagrama $\log P$ - $\log \dot{P}$	31
8.	Diagrama $\log P$ - $\log L$	32
9.	Diagrama $\log P$ - $\log W$	33
10.	Cantidad total de pulsares N_T y pulsares activos N_P en función de los parámetros t_f , α_3 y ΔZ	40
11.	Radio telescopios utilizados en la simulación	42
12.	Radiopulsares detectados ($S/N = 5$, $t_d = 6$ min)	46
13.	Radiopulsares detectados ($S/N = 5$, $t_d = 12$ min)	47
14.	Radiopulsares detectados ($S/N = 7$, $t_d = 6$ min)	48
15.	Radiopulsares detectados ($S/N = 7$, $t_d = 12$ min)	49

TABLAS

I.	Índice espectral para una IMF	23
II.	Tiempos en secuencia principal en función de la masa estelar	26
III.	Parámetros estadísticos calculados de la población de radiopulsares de la Vía Láctea	33
IV.	SFH de SdSph	36

V. Parámetros aleatorios de los modelos utilizados 37

VI. Resultados de los modelos (a-m) aplicados a SdSph 39

VII. Características de los radiotelescopios utilizados 43

VIII. Resultados de observaciones con diferentes radiotelescopios 45

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
$\Delta\nu$	Ancho de banda
W	Ancho de pulso
B	Campo magnético
Y	Cantidad de He como fracción en masa
\star	Característica estelar
\odot	Característica solar
M	Catálogo de objetos astronómicos de Messier
a, b, c, C, k, K	Constantes generales
τ	Constantes temporales
σ	Desviación estándar
Det	Detectados
d	Distancia
$\mathcal{L}(a, b)$	Distribución log-normal centrada en a , con desviación b
$\mathcal{N}(a, b)$	Distribución normal centrada en a , con desviación b
$\mathcal{U}(a, b)$	Distribución uniforme en el intervalo (a, b)
EN	Estrella de neutrones
SNeII	Evento supernova tipo II
β	Factor de corrección
β	Factor de emisión
ν	Frecuencia de observación
$\xi(m)$	Función de masa inicial
IMF	Función de masa inicial (siglas)
G	Ganancia de antena

$\psi(m, t)$	Historia de formación estelar
SFH	Historia de formación estelar (siglas)
α, γ	Índice espectral
i, j	Índice de sumatoria
[Fe/H]	Logaritmo de fracción de Fe–H
L	Luminosidad
m, M, \mathcal{M}	Masa
μ	Media
Z	Metalicidad como fracción masa
Per	Método de detección por periodicidad
Pul	Método de detección por pulsos individuales
min	Mínimo
N	Número de objetos
n_p	Número de polarizaciones
P	Periodo
\mathcal{P}	Potencia
S/N	Razón señal-ruido
MS	Secuencia principal
sys	Sistema
$\varphi(t)$	Tasa de formación estelar
SFR	Tasa de formación estelar (siglas)
T	Temperatura
t	Tiempo
Δ	Variación, diferencia

GLOSARIO

Estrella	Esfera luminosa de plasma sostenida por su propia gravedad y la presión de radiación.
Luminosidad	Es la potencia (cantidad de energía por unidad de tiempo) emitida en todas direcciones por un cuerpo celeste.
Materia Oscura	Tipo de materia que existe en el universo. No puede ser vista directamente con telescopios ya que no interactúa por medios electromagnéticos. Su naturaleza es estudiada e inferida por sus efectos sobre la materia visible y la radiación y por la estructura del universo.
Metalicidad	Proporción de material de elementos químicos más pesados que el helio.
Neutrón	Partícula subatómica perteneciente a los hadrones, no presenta carga eléctrica y su masa es ligeramente mayor a la del protón ($1,674927351(74) \times 10^{27}$ kg).
Opacidad	Medida de la impenetrabilidad de la radiación, ya sea de partículas o electromagnética, en un medio material.
Razón Señal–Ruido	Es la proporción existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe.

RESUMEN

Se presenta un modelo para describir la población de radiopulsares típicos en una galaxia enana esferoidal. El modelo toma en cuenta la historia de formación estelar (*Star Formation History* –SFH–), la distribución inicial de masa (*Initial Mass Function* –IMF–), la metalicidad e incluye un modelo simple que describe la evolución temporal del campo magnético de los pulsares. Como base para la construcción del modelo se utilizó la población actual de pulsares en la Vía Láctea. Adicionalmente se evalúa la detectabilidad de los radiopulsares de la población generada por medio de la simulación de observaciones con diferentes radiotelescopios (Green Bank Telescope, Parkes Multibeam, Westerbork Telescope, Allen Telescope Array, Low Frequency Array y Square Kilometer Array) por los métodos de búsqueda por periodicidad y por pulsos individuales.

El modelo y la simulación de las observaciones fueron implementadas por medio del método Monte Carlo y aplicado a la galaxia esferoidal enana de Sculptor (SdSph) en diferentes etapas de su evolución. Se concluye que la SFH de Sculptor es tan antigua que la población actual de radiopulsares es insignificante. Además se establece que el instrumento con mayor sensibilidad a una población como la de Sculptor es Square Kilometer Array, logrando detectar $\sim 1\%$ de radio pulsares, frente a un $< 0,02\%$ de objetos detectables para los radiotelescopios restantes.

OBJETIVOS

General

Utilizar modelos numéricos para simular el contenido estelar, específicamente estrellas de neutrones, de las galaxias enanas satélites de la Vía Láctea y determinar su detectabilidad con instrumentos modernos.

Específicos

1. Cuantificar el número de radiopulsares en una galaxia esferoidal enana.
2. Determinar si los radiopulsares de las galaxias esferoidales enanas son visibles con los radiotelescopios Parkes (Australia), Green Bank Telescope (EE. UU.) y Low Frequency Array (Países Bajos).
3. En el caso de no ser detectables con los instrumentos ya mencionados, establecer cuál es la sensibilidad necesaria para que un instrumento pueda detectarlos, en particular los proyectos Square Kilometer Array (Sudáfrica) y Allen Telescope Array (EE. UU.).

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes retos actuales en el estudio de los pulsares es detectarlos en sistemas extragalácticos. Ya en la década de 1980 pulsares fueron detectados en las Nubes de Magallanes (McCulloch 1983) y en cúmulos globulares (Lyne 1987). Algunas de las propuestas de investigación apuntan a la búsqueda de pulsares en galaxias cercanas como M 33, M 31 y las galaxias satélites de la Vía Láctea. El descubrimiento de pulsares en estos objetos hace posible el estudio del medio intergaláctico y de las poblaciones de pulsares en sistemas diferentes a la Vía Láctea.

El desarrollo de este trabajo de graduación aborda y discute los siguientes temas: (i) la población de estrellas de neutrones en las galaxias enanas satélites de la Vía Láctea y (ii) la detectabilidad de radiopulsares en estas galaxias utilizando diferentes radiotelescopios, ya sea en funcionamiento o aún en construcción. Para el caso se utilizó una simulación numérica por el método Monte Carlo basada en un modelo de población estelar para galaxias esferoidales enanas.

La distribución de los capítulos es la siguiente: el primer capítulo inicia con una breve revisión bibliográfica donde se presentan los aspectos teóricos generales utilizados en la investigación. Se definen y caracterizan los objetos de estudio: galaxias, pulsares y métodos e instrumentos para la detección de radiopulsares. El capítulo finaliza explicando dos modelos de simulación numérica utilizando el método Monte Carlo fundamentales para el desarrollo de este trabajo. El primero es el desarrollado por D. Lorimer et al. (2006) para el “Parkes Multibeam (PMB) pulsar survey” donde se utiliza el método Monte Carlo en la simulación de la población de radiopulsares en la Vía Láctea. El segundo es el desarrollado por E. Rubio-Herrera et al. (2010) para

el “Galactic and Extragalactic Searches for Pulsars and Radio Transients” donde se utiliza el método Monte Carlo en la asignación de características de los radiopulsares individuales en una población para evaluar su detectabilidad en sistemas extra galácticos.

El segundo capítulo desarrolla los aspectos claves de las poblaciones de estrellas de neutrones en una galaxia. Se describe el efecto de la Función de Masa Inicial, la Historia de Formación Estelar, la metalicidad en una población estelar. Además se estudia un mecanismo de evolución temporal de un radiopulsar por medio del decaimiento exponencial de su campo magnético. En la sección final se realiza un modelo estadístico simple para las propiedades de los pulsares observados en la Vía Láctea.

El tercer capítulo integra los aspectos tratados en el segundo capítulo en un modelo único que describe la población estelar de una galaxia. El modelo es aplicado mediante el método Monte Carlo para calcular la cantidad de radiopulsares generados y radiopulsares activos en la galaxia enana esferoidal de Sculptor (SdSph) utilizando los datos reportados por de Boer (2012). Se generaron 13 poblaciones con diferentes condiciones de metalicidad, IMF y tiempo de evolución, donde se deduce que la población actual de radiopulsares en SdSph es insignificante.

El último capítulo utiliza una de las poblaciones generadas en el capítulo anterior para evaluar la detectabilidad de los radiopulsares en la SdSph. Para este fin se realizaron una serie de simulaciones de observaciones con los radiotelescopios de Green Bank Telescope, Parkes Multibeam, Westerbork Telescope, Allen Telescope Array, Low Frequency Array y Square Kilometer Array (SKA). Los resultados muestran una amplia diferencia entre la cantidad de radiopulsares observables utilizando SKA respecto al resto de radiotelescopios considerados.

1. ANTECEDENTES

1.1. Galaxias y clasificación galáctica

Una galaxia es un sistema dinámico ligado de varias estrellas. Además de estrellas, una galaxia contiene gas, polvo y materia oscura.

Las galaxias son una clase muy diversa de objetos, esto significa que para caracterizar una galaxia es necesaria una gran cantidad de parámetros. Entre los parámetros más sobresalientes de clasificación galáctica están:

- Morfología: la clasificación de Hubble es de carácter histórico y, aunque con algunas modificaciones menores, continúa vigente en la astronomía moderna. Divide las galaxias según su forma aparente en elípticas, lenticulares, espirales, espirales barradas e irregulares (Hubble 1926).
- Luminosidad y masa estelar: el rango de luminosidades para las galaxias es $10^3 - 10^{12} L_{\odot}$. La luminosidad está ligada a la cantidad de estrellas de la galaxia (mayor luminosidad más estrellas), dividiéndolas en galaxias convencionales y galaxias enanas.
- Actividad nuclear: en la mayoría de galaxias la luz observada corresponde a la esperada de un grupo de estrellas y el gas que las rodea. Sin embargo, una pequeña fracción de galaxias, las galaxias activas, muestra una componente no estelar en la distribución espectral de energía. Esta emisión se da en una pequeña región en el centro de estas galaxias llamadas AGN¹ y está asociada

¹*Active Galaxy Nucleus*

a la acreción de materia en un agujero negro supermasivo. De esta manera, las galaxias pueden clasificarse en galaxias activas y galaxias “normales” (no-activas).

- Razón gas–masa: es una manera de determinar la eficiencia de conversión de gas frío en estrellas. Galaxias con poco gas tienen (o han tenido) una mejor conversión gas-materia estelar.
- Color: el color es la comparación de las luminosidades en dos filtros en un sistema fotométrico. El color se relaciona con la metalicidad y la edad de la población estelar; entre más “roja” es una galaxia más antigua o de menor metalicidad (o ambas) es su población estelar.

1.1.1. Galaxias esferoidales enanas

De los diferentes tipos de galaxias interesan las galaxias esferoidales enanas² (dSph, por sus siglas en inglés). Estas galaxias tienen forma esferoidal, son poco luminosas, tienen pocas estrellas, no presentan actividad en su núcleo, tienen bajo contenido de gas y son bastante enrojecidas. La galaxia enana esferoidal de Sculptor (figura 1) es una típica galaxia esferoidal enana satélite de la Vía Láctea que está a unos 85 ± 6 kpc del sistema solar (de Boer 2012).

La razón luminosidad–masa \mathcal{M}/L de una dSph revela una gran cantidad de materia oscura en comparación a otras galaxias. Su abundancia indica que la mayor parte de masa en este tipo de galaxias está en forma de materia oscura. Incluso se cree que las dSph son las estructuras más pequeñas asociadas a halos de materia oscura que existen en el universo.

²*Dwarf Spheroidal Galaxies*

Figura 1. **Galaxia esferoidal enana de Sculptor (SdSph)**



Fuente: De Boer, T. J. L. et al. *The star formation & chemical evolution timescales of two nearby dwarf spheroidal galaxies*. p. 10.

Por sus características tan similares se ha sugerido que una dSph es un tipo de cúmulo globular, ya que las dSph más pequeñas son muy parecidas a los cúmulos globulares más grandes. Sin embargo, la diferencia de metalicidad entre los dos objetos (las dSph tienen menor metalicidad que los cúmulos globulares) y la presencia de materia oscura en las galaxias esferoidales (los cúmulos no tienen materia oscura asociada) son las formas para distinguir entre estos objetos (van den Bergh 2007).

1.2. Estrellas de neutrones y pulsares

Las estrellas de neutrones son un tipo de remanente estelar formado por el colapso gravitacional de la región central de una estrella; esto es, por la contracción

catastrófica debida a la pérdida del equilibrio hidrostático entre la gravedad y la presión de radiación. Este proceso sucede en:

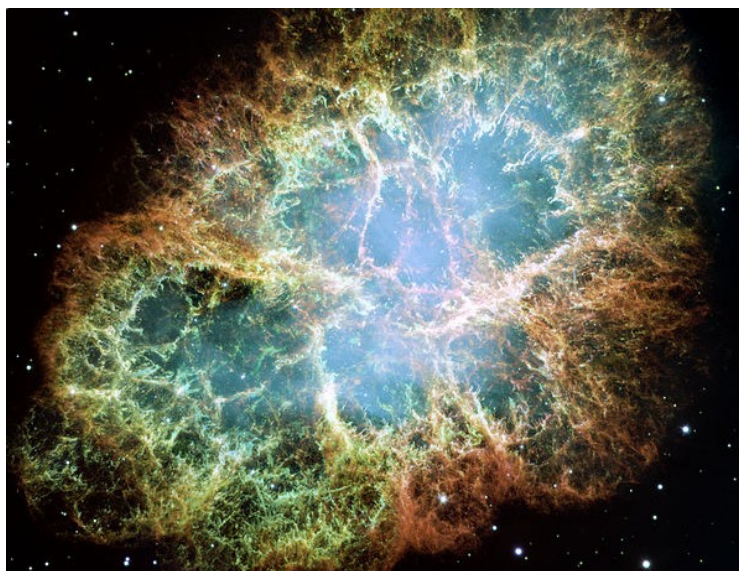
- Núcleos de baja masa ($\leq 2M_{\odot}$) de estrellas masivas ($9 - 25 M_{\odot}$) en la secuencia principal (Supernovas Tipo II, SNeII).
- Enanas blancas que exceden por proceso de acreción la masa del límite de Chandrasekhar, $m \approx 1,4M_{\odot}$ (Chandrasekhar 1935).

La Nebulosa del Cangrejo (M 1, figura 2) es el remanente estelar resultado de una explosión SNeII ocurrida en 1054 D.C. Se ubica en la constelación de Tauro. En su centro se encuentra una estrella de neutrones. La imagen es una composición de diferentes espectros: óptico (Hubble Space Telescope), rayos-X (Chandra) e infrarrojo (Spitzer Space Telescope).

Las estrellas de neutrones fueron predichas teóricamente por Landau (Yakolev 2012) en la década de 1930 y de manera independiente por Baade y Zwicky (1934), solamente un año después del descubrimiento del neutrón, como producto de una explosión supernova. Este tipo de estrellas permaneció por algunas décadas solamente como un resultado teórico, ya que no existían candidatos observacionales para ser una estrella de neutrones. Fue cuando Bell y Hewish (1967) detectan el primer pulsar que la idea vuelve a tener interés. Fue Gold (1968) quien asoció los pulsares con estrellas de neutrones en rotación.

Un pulsar puede definirse como un objeto, típicamente una estrella de neutrones, que emite radiación pulsada debido a su rotación y es impulsado por energía rotacional. Esta definición incluye la descripción de diferentes objetos: los (i) radio-pulsares; (ii) los pulsares en rayos-X; y (iii) los pulsares de milisegundos.

Figura 2. **Nebulosa del Cangrejo (M 1)**



Fuente: Hester, J.; Loll, A. Arizona State University, NASA, ESA.
<<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/2005/37/image/a/>>

1.2.1. Radiopulsares y sus características

Los radiopulsares son estrellas de neutrones en rotación, altamente magnetizadas que emiten un haz estrecho de radiación a lo largo del eje del dipolo magnético. Como el eje magnético está inclinado respecto al eje de rotación, el pulsar se comporta como un faro emitiendo pulsos en radio que pueden ser detectados una vez por cada rotación, cuando el haz está dirigido hacia la tierra.

Entre las características fundamentales de los radiopulsares están:

- Periodo: la emisión de un radiopulsar viene forma de pulsos separados. El intervalo de tiempo entre pulsos es llamado periodo. El periodo de un radiopulsar está en el intervalo $P \sim 0,3 - 3,5$ s.
- Derivadas del periodo: la primera derivada del periodo en el tiempo $dP/dt \rightarrow \dot{P}$ se encuentra en el intervalo $10^{-14} - 10^{-16}$ para la mayoría de radiopulsares.
- Edad dinámica: es la edad asociada a un pulsar si la única forma de perder energía fuera la radiación de dipolo. Es un buen indicador de la edad real de un pulsar joven ($t < 10^4$ yrs) pero no para uno antiguo. Se calcula por

$$\tau_c = \frac{P}{2\dot{P}} \quad (1.1)$$

- Campo Magnético: el valor del campo magnético en la superficie del radiopulsar, asumiendo un dipolo magnético radiante, se calcula por

$$B = \frac{3c^3 I}{8\pi^2 R^6} (P\dot{P})^{1/2} = C_B (P\dot{P})^{1/2} \quad (1.2)$$

donde I es el momento de inercia, R es el radio y $C_B = 3,0 \times 10^{19}$ G/s (Kramer 2005). El campo magnético de un radiopulsar típico es de $B \sim 10^{12}$ G (Cordes, Kramer et al. 2005).

- Ancho de pulso: la emisión de un pulso usualmente solo ocupa una fracción del tiempo, típicamente entre un 5 y un 10 % del periodo. El ancho del periodo se relaciona con el periodo por medio de una ley de potencias $W \propto P^{a_w}$.
- Espectro de emisión: la densidad de flujo S_ν depende de la banda de observación ν . Se suele modelar $S \propto \nu^{-\gamma}$, donde γ es llamado índice espectral y para el 95 % de radiopulsares tiene un valor de $\gamma = 1,8 \pm 0,2$ para $\nu > 300$ MHz (Maron 2000).

- Luminosidad en radio: se determina por medio de la pseudoluminosidad, definida por

$$L_\nu = d^2 S_\nu \quad (1.3)$$

donde d es la distancia entre el objeto y el observador.

- Fluctuaciones de intensidad: la energía radiada en un pulso fluctúa, cambiando sustancialmente entre pulsos. Este fenómeno causa que exista un histograma de luminosidades para cada radiopulsar. Hesse (1973) clasifica los histogramas según su forma en monomodal, normal y bimodal. En lo siguiente, se utilizará la clasificación presentada por Rubio–Herrera (2010): (i) normal, (ii) log-normal y (iii) ley de potencias.

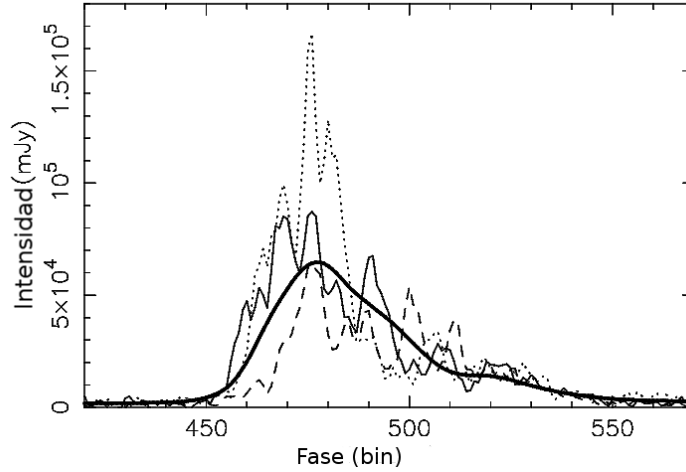
Otro fenómeno relacionado con la fluctuación de intensidad en un pulsar son los “pulsos anulados”³. El fenómeno de los pulsos anulados es el cese repentino de emisión de radiación. Se cree que este comportamiento es típico de pulsares antiguos. Además, se da la emisión eventual de “pulsos gigantes” que van desde 100 hasta 1 000 veces la intensidad promedio del radiopulsar. Se cree que este comportamiento es habitual en pulsares recientemente formados, por ejemplo, el caso extremo conocido es la radiofuente Crab (M 1, asociado al radiopulsar B0531+21) que emite hasta 10^5 Jy en pulsos de 100 μ s de duración (Hankins y Rickett 1975).

En la figura 3 se muestra la sobreposición de 3 pulsos provenientes de la radiofuente Vela (PSR B0833–45).

Adicionalmente a los radiopulsares ya mencionados (los llamados radiopulsares típicos) existen otros radiopulsares con características ligeramente diferentes (Cordes, Kramer et al. 2005). Estos son:

³*Nulling pulsars.*

Figura 3. Pulsos sobrepuestos de la radiofuente Vela



Fuente: Cairns, I. H. et al. “Intrinsic variability of the Vela Pulsar: Log-normal statistics and theoretical implications”. p. 6.

- Pulsares reciclados: son objetos que han sido acelerados por la acreción de material proveniente de la explosión SN de la estrella compañera en un sistema binario. Se caracterizan por tener $P \sim 30$ ms y $\dot{P} \sim 10^{-18}$.
- Pulsares de milisegundos: son objetos que han sido acelerados por la acreción de material proveniente de la explosión SN de la estrella compañera en un sistema binario, donde esta se convierte en una enana blanca. Se caracterizan por tener un a gran velocidad de rotación $P \sim 5$ ms y $\dot{P} \sim 10^{-20}$ con un campo magnético bastante débil $\sim 10^{8-9}$ G. Se estima que el tiempo de actividad de una pulsar de milisegundos es de 10^{8-10} yr (Lorimer 2005).
- Pulsares con gran campo magnético: son pulsares que alcanzan campos magnéticos $\gtrsim 10^{14}$ G que emiten radiación en rayos X- γ que son generados por mecanismos diferentes a la rotación. Se caracterizan por tener $P \sim 5$ s y $\dot{P} \sim 10^{-13}$.

Estos objetos, aunque interesantes por sus características extremas, representan una minoría en la población total de radiopulsares. Se estima que su probabilidad de ocurrencia es de 10^{-3} a 10^{-4} veces la de un radiopulsar típico (Cordes, Kramer et al. 2005).

1.3. Métodos e instrumentos para la detección de radiopulsares

Un radiopulsar, además de emitir en radio, puede emitir en cualquier banda del espectro electromagnético. En este caso interesa la detección de radiación en la banda de radio (longitudes de onda en el intervalo $10^{-1} - 10^1$ m)⁴ que pueden ser fácilmente recibidas en tierra debido a la baja opacidad atmosférica en esta región del espectro.

1.3.1. Instrumentos: radiotelescopios

Un radiotelescopio es una antena direccional usada en astronomía. Es un instrumento para convertir la radiación electromagnética en el espacio en corriente eléctrica en un conductor. Debido al gran intervalo de frecuencias que cubre la banda radio, los radiotelescopios tienen diferentes formas y tamaños, sin embargo el funcionamiento general del aparato es el mismo en cualquier caso. En la actualidad las antenas en forma de “disco” son las más comunes.

En la figura 4 se muestra el “Gran Telescopio Milimétrico” (GTM) el radiotelescopio de disco más grande y más sensitivo en su rango de frecuencias (0,85–4 mm) construido hasta la fecha.

⁴Corresponde a frecuencias entre 10^9 - 10^7 Hz

Figura 4. **Gran Telescopio Milimétrico (GTM)**



Fuente: Volcán Sierra Negra, Puebla, México.

Las características generales de los radiotelescopios y los sistemas de detección asociados son:

- **Ganancia:** es la medida de la disponibilidad del instrumento para amplificar una señal. Está relacionada con el área colectora de la antena por medio de $G = A/2k_B$; donde G es la ganancia, A es el área colectora y k_B es la constante de Boltzman.
- **Número de polarizaciones:** es la cantidad de orientaciones espaciales diferentes del campo eléctrico que una antena puede detectar al mismo tiempo. Por la naturaleza del campo eléctrico es $n_p = 1$ para observaciones de una polarización y $n_p = 2$ para observaciones de dos polarizaciones ortogonales.
- **Frecuencia de observación:** es la frecuencia para la cual la antena fue diseñada.

- Ancho de banda: es el intervalo de frecuencia donde la antena es utilizable.
- Factor de corrección: toma en cuenta las imperfecciones del sistema de detección. Estas imperfecciones surgen por la digitalización de la señal de manera que $\beta > 1$. Para digitalizadores de 1-bit $\beta \approx 1,25$ para correlacionadores de 3-niveles $\beta \approx 1,16$ y para digitalizadores de 2-bit $\beta \approx 1,3$.
- Temperatura del sistema: relaciona la potencia de la antena con la temperatura de un resistor acoplado que disipa la misma potencia. Esta relación se expresa por la ecuación $\mathcal{P} = k_B T$. La temperatura del sistema se determina sumando los aportes de diferentes fuentes

$$T_{sys} = T_{rec} + T_{suelo} + T_{atm} + T_{cielo}$$

- La temperatura del receptor T_{rec} , ($T \sim 20$ K para sistemas enfriados);
- La temperatura del suelo T_{suelo} , es una función que depende fuertemente de la elevación, aunque típicamente $T \leq 10$ K;
- La temperatura de la atmósfera T_{atm} es un factor importante para observaciones a frecuencias mayores a los 5 GHz ($T \sim 3$ K) y;
- La temperatura del cielo T_{cielo} , debida a la radiación de fondo cósmico (que aporta $T = 3$ K) y a la radiación de sincrotrón proveniente de los electrones libres de la galaxia. Debido a la distribución de electrones en la galaxia no es uniforme la temperatura del cielo depende de la dirección de observación elegida. Es mayor para direcciones cercanas al centro galáctico y casi despreciable para observaciones a altas latitudes galácticas.

1.3.2. Detectabilidad de pulsares

La detección de nuevos radiopulsares puede hacerse por diferentes métodos. En este caso se discutirán:

- Detectabilidad por periodicidad
- Detectabilidad de pulsos individuales

En cualquier caso, se evalúa la luminosidad en radio mínima que, a una distancia determinada, debe tener un radiopulsar para ser detectable según el tiempo de integración, la razón señal-ruido S/N , los parámetros del radiotelescopio y las características individuales del radiopulsar.

1.3.3. Detección por periodicidad (análisis de Fourier)

Hace uso de la conocida periodicidad de los radiopulsares. Es conveniente en pulsares con poca dispersión en sus pulsos y que no presenten *nulling*. Se utiliza la transformada de Fourier de la serie de datos obtenidos en un tiempo de integración t_d para determinar, en el dominio de la frecuencia, el periodo del pulsar. Este tipo de detección se evalúa por medio de la ecuación del radiómetro modificada por Lorimer y Kramer (2005)

$$\frac{L_{min}}{d^2} = \beta \frac{S/N_{min} T_{sys}}{G \sqrt{n_p t_d \Delta \nu}} \sqrt{\frac{W}{P - W}} \quad (1.4)$$

1.3.4. Detección por pulsos individuales

Es detectar un pulsar en el dominio del tiempo utilizando los pulsos de alta intensidad que algunos radiopulsares presentan. Esta manera de detectar pulsares es adecuada para pulsares que emiten pulsos gigantes y que tienen *nulling*. Este tipo de detección se evalúa por la ecuación del radiómetro modificada por McLaughling y Cordes (2003):

$$\frac{L_{min}}{d^2} = \frac{S/N_{min}T_{sys}}{G\sqrt{n_p\Delta\nu W}} \quad (1.5)$$

1.4. Modelos y simulación numérica

Un modelo es una representación parcial de algún tipo (sea físico, matemático, numérico, abstracto, etc.) de una parte de la naturaleza que sirve para entender y predecir su comportamiento (Frigg y Hartmann 2012). En el caso de la física, los modelos deben presentarse como una formulación matemática o ecuación que sintetiza las características esenciales de un sistema como una relación de dependencia entre diferentes variables y parámetros con el fin de determinar su comportamiento.

1.4.1. Simulación

El uso de un modelo para reproducir un sistema, su comportamiento, sus características y/o su evolución es llamado simulación. Cuando la simulación se lleva a cabo por medio de algoritmos y métodos numéricos es llamada simulación numérica. La simulación numérica requiere de dos grandes fuentes de información para

su implementación: (i) la teoría adecuada que represente el sistema; y (ii) datos observacionales que alimenten los cálculos fundamentados en dicha teoría.

Cuando es imposible la experimentación directa del objeto de estudio, como en el caso de la astrofísica, la simulación numérica muestra todo su potencial. Esta permite al “experimentador” estudiar fenómenos que necesitan miles de millones de años en completarse, por ejemplo la formación y evolución del Universo en la simulación del milenio (Springel 2005). En ese sentido, los experimentos numéricos son una poderosa herramienta en el estudio del comportamiento de sistemas astrofísicos.

1.4.2. Método Monte Carlo (MMC)

El método Monte Carlo (MMC) es un método numérico para resolver problemas matemáticos utilizando un generador de números aleatorios. Este método es muy útil en la resolución numérica aproximada de problemas, donde encontrar una solución analítica es muy complicado o es imposible. El nombre de “Monte Carlo” hace alusión a la ciudad homónima (Mónaco), famosa por sus lugares de apuestas y juegos de azar, que de alguna manera sirvieron de inspiración para su creación. Se acepta como año de nacimiento el 1949, cuando fue publicado el artículo “The Monte Carlo Method” por Ulam y Metropolis (1949). Otros personajes involucrados, tanto en la implementación como en la teoría fundamental, fueron Von Neuman y Fermi ambos durante su participación en el proyecto Manhattan dedicado al desarrollo de la bomba atómica.

1.4.3. MMC en poblaciones de radiopulsares

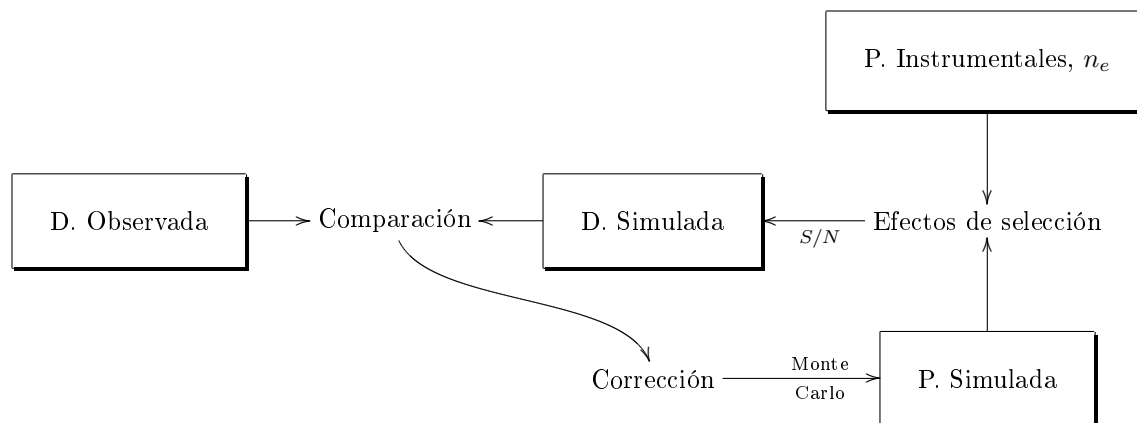
Aunque los orígenes del método estén en la física nuclear existen muchos otros campos de aplicación. A continuación se presenta una síntesis del modelo de población y detección de radiopulsares en la Vía Láctea, desarrollado por D. Lorimer et al. (2006) para el “Parkes Multibeam (PMB) pulsar survey”.

En el PMB survey se descubrieron 742 pulsares nuevos y en conjunto con el “High Latitud (PH) pulsar survey”, se han detectado 1 055 pulsares, de los cuales para el análisis se consideran solamente 1 008 pulsares: los que no son binarios y con $P > 30$ ms.

Las variables utilizadas en la generación de las funciones de distribución son: periodo P , luminosidad a 1 400 MHz L_{1400} , radio galactocéntrico R , altura sobre el plano galáctico z . Cada variable se supuso independiente de las demás, ya que no existe correlación alguna entre ellas (Lorimer y Kramer 2005, Lorimer et al. 2006).

El objetivo principal fue deducir la población de radiopulsares en la galaxia que reproduce las distribuciones observadas. Para el efecto, se obtiene una población simulada por medio del método Monte Carlo. Luego, con la ecuación de la razón señal/ruido y por los efectos de selección (parámetros instrumentales del PMB y la distribución de electrones libres en la galaxia, n_e) se establece cual será la distribución simulada. Luego, se comparan la distribución observada y la distribución simulada. Si la población simulada es la adecuada ambas deberían ser estadísticamente iguales. El procedimiento funciona iterativamente, existiendo una corrección de la distribución simulada para que en cada iteración las distribución observada y la distribución simulada sean más parecidas. El diagrama del procedimiento se muestra en la figura 5.

Figura 5. Diagrama de flujo



Fuente: elaboración propia.

Por medio de esta simulación se establece que existen $155\,000 \pm 6\,000$ pulsares en la galaxia, donde $30\,000 \pm 1\,100$ son pulsares detectables (i.e. apuntando hacia los instrumentos de detección) en la banda de 1,4 GHz, con luminosidades mayores a $0,1 \text{ mJy kpc}^2$. Se encuentra además que la distribución radial de los pulsares está muy relacionada a la distribución de electrones libres de la galaxia.

El método presentado por Lorimer et al. permite determinar las características de la población de radiopulsares en la galaxia, basados en un modelo estadístico y una simulación Monte Carlo. También permite probar el efecto de diferentes modelos de distribución de electrones libres de la galaxia en la detección de radiopulsares. Además, es posible proyectar los resultados esperados de nuevas búsquedas⁵ con radiotelescopios diferentes al PMB.

⁵Los llamados *surveys*, en inglés.

1.4.4. MMC en las características individuales de los pulsares

En una población de radiopulsares pueden establecerse las propiedades individuales de cada objeto i.e. periodo, luminosidad y el histograma de fluctuaciones de intensidad.

El MMC es utilizado en la asignación aleatoria de parámetros que caracterizan al pulsar, en la selección del grupo al que pertenece cada pulsar en una población y en la generación de los pulsos que siguen la distribución. Este tipo de simulación permite reproducir del comportamiento de poblaciones de pulsares conocidos para el estudio de nuevas técnicas/métodos de detección de pulsares y de la sensibilidad que estos métodos pueden alcanzar (Rubio-Herrera 2010).

2. MODELO DE POBLACIÓN DE RADIOPULSARES

Una población de radiopulsares en una población estelar se define con base en: (i) la edad y cantidad de SNeII productores de EN y; (ii) Las características individuales de de cada pulsar formado.

2.1. Cantidad de SNeII producidas en una galaxia

Como se mencionó en el capítulo anterior, las EN son producidas por eventos SNeII. Para comenzar se discutirá cuales son las masas estelares que producen un evento SNeII y las condiciones de metalicidad que afectan estos valores. Además, se describe la distribución de masas en una población estelar galáctica y como esta puede verse afectada por la metalicidad y la densidad de la nube progenitora. La fracción de EN que pueden observarse como radiopulsares se considera por medio del factor de emisión. Finalmente, se analizan la historia de formación estelar y la evolución de las características relacionadas con el decaimiento del campo magnético de un radiopulsar.

2.1.1. Masa y metalicidad en la producción de SNeII

Los eventos SNeII que originan EN se dan en un rango muy específico de masas ya que el remanente formado debe estar comprendido entre el límite de Chandra-

sekhar, $m \approx 1,4 M_{\odot}$, y el límite de Tolman-Oppenheimer-Volkoff, $m \sim 1,5 - 3,0 M_{\odot}$ (Oppenheimer y Volkoff 1939, Tolman 1939).

Los mecanismos físicos involucrados en la etapa final de la evolución estelar son la metalicidad y la pérdida de masa. Estrellas de baja metalicidad tienen menor pérdida de masa por vientos estelares (el material de las capas más externas tiene una menor opacidad), tienen mayores núcleos de He y mayores y mejor definidas envolturas de H. Por otra parte, estrellas de alta metalicidad tienen mayores pérdidas de masa, ya sea por viento estelar o por pulsaciones, comparadas con las de igual masa pero con menor metalicidad (Heger 2002).

Los límites de masas estelares de estrellas que evolucionan a SNeII productoras de EN depende en gran medida de la metalicidad. Heger (2002) establece la masa estelar máxima para una SNeII como una cantidad casi constante $m_{max} \sim 25 M_{\odot}$ para entornos con metalicidades menores a la solar. Por el contrario, para metalicidades mayores a la solar este límite desaparece siendo la masa estelar máxima que puede generar un SNeII igual a la masa máxima esperada de una población estelar, $m_{max} \sim 120 M_{\odot}$.

Ibeling y Heger (2013) calculan la masa estelar mínima para un SNeII productora de EN como una función polinomial de $[Z] = \log(Z/Z_{\odot})$

$$\frac{m_{min}}{M_{\odot}} = \sum_{i=0}^6 a_i [Z]^i \pm 0,15 \quad (2.1)$$

donde

$$\begin{aligned}
a_0 &= +9,40858 \times 10^{+0} & a_1 &= +1,14548 \times 10^{+0} \\
a_2 &= +3,96411 \times 10^{-1} & a_3 &= +2,96185 \times 10^{-2} \\
a_4 &= -8,79237 \times 10^{-3} & a_5 &= -1,96134 \times 10^{-3} \\
a_6 &= -1,11999 \times 10^{-4}
\end{aligned}$$

para $[Z] \geq -8,3$ y $[Z] = 9,19$ para $[Z] < -8,3$.

2.1.2. Función de masa inicial (IMF)

La función de masa inicial¹ (IMF, por sus siglas en inglés) es el número de estrellas dN que han nacido con masas en el intervalo entre m y $m + dm$ en un evento de formación estelar. Las IMF han sido estimadas para diferentes sistemas estelares que incluyen pequeñas nubes moleculares con regiones recientes de formación estelar, densos y masivos clusters y para galaxias antiguas, de baja de metalicidad dominadas por materia oscura. Aunque teóricamente se concluye que la IMF debería depender de factores como la densidad y la metalicidad de la nube progenitora, las IMF para la mayoría sistemas estudiados muestran una gran uniformidad, por lo que puede aceptarse que la forma que presenta es independiente de las condiciones de formación estelar del medio (Kroupa 2002).

Existen diferentes expresiones para la IMF de un sistema estelar. La primera de ellas fue propuesta por Salpeter en 1955 para estrellas en vecindad solar en el intervalo $0,4 < m/M_{\odot} < 10$

¹*Initial Mass Function*

$$\xi(m) = k m^{-2,35}$$

donde $k = 0,03 \text{ pc}^{-3} m_{\odot}^{-1}$ es un factor de escala que depende de la densidad de la nube gaseosa que origina la población estelar.

Este resultado puede generalizarse como una ecuación en ley de potencias de la forma

$$\xi(m) = k(m) m^{-\alpha(m)} \quad (2.2)$$

donde $\alpha(m)$ es llamado índice espectral y depende explícitamente de la masa.

Kroupa (2002) sugiere una dependencia de los índices espectrales con la metalicidad del medio de forma $\alpha_i([\text{Fe}/\text{H}]) = \alpha_{i,0} + K_i[\text{Fe}/\text{H}]$. Este planteamiento lo estudia Bekki (2005) concluyendo que estos índices se adecúan bien a modelos de galaxias con altas metalicidades, abundante gas residual y un alto contenido de polvo. Ya que las dSph no tienen ninguna de estas características se utilizará una IMF con índices constantes. En este caso, simplificando la Ec. 2.2 como una ley de potencias definida por partes

$$\xi(m) = k_i m^{-\alpha_i}; \text{ en el intervalo } m_i < m < m_{i+1} \quad (2.3)$$

La tabla I muestra los intervalos e índices espectrales para una IMF definida por partes obtenidos de los calculados para diverso tipo de poblaciones estelares (Kroupa 2002).

Tabla I. **Índice espectral para una IMF**

Índice	Índice espectral	Intervalo	Masa
$i = 0$	$\alpha_0 = 0,3 \pm 0,7$	$0,01 < m/M_{\odot} < 0,08$	$m_0/M_{\odot} = 0,01$
$i = 1$	$\alpha_1 = 1,3 \pm 0,5$	$0,08 < m/M_{\odot} < 0,50$	$m_1/M_{\odot} = 0,08$
$i = 2$	$\alpha_2 = 2,3 \pm 0,3$	$0,50 < m/M_{\odot} < 1,00$	$m_2/M_{\odot} = 0,50$
$i = 3$	$\alpha_3 =$ $2,7 \pm 0,3$ $2,3 \pm 0,3$	$1,00 < m/M_{\odot} < 120$	$m_3/M_{\odot} = 1,00$
$i = 4$	–	–	$m_4/M_{\odot} = 120$

Fuente: Kroupa, P. “The Initial Mass Function of Stars: Evidence for Uniformity in Variable Systems”. p. 91.

El valor para α_3 varía dependiendo de la densidad de la nube molecular que origina la formación estelar, siendo los valores más altos los correspondientes regiones más compactas.

Las constantes k_i son específicas para cada población estelar. Para calcularla se utilizará la expresión normalizada de la IMF $\bar{\xi}$, con una masa total \mathcal{M}_{\star} de una población con límites de masas estelares inferior m_0 y superior m_4 como

$$\mathcal{M}_{\star} = \int_{m_0}^{m_4} dm m \xi(m) \rightarrow 1 = \frac{1}{\mathcal{M}_{\star}} \int_{m_0}^{m_4} dm m \bar{\xi}(m) \quad (2.4)$$

Ya que la función $\xi(m)$ es continua y no tiene saltos, los valores los extremos adyacentes de cada tramo deben coincidir. De esta manera se obtienen la relación

$$k_i m_i^{-\alpha_i} = k_{i-1} m_i^{-\alpha_{i-1}}$$

de lo que resulta la expresión generalizada

$$k_j = k_0 \prod_{i=1}^j m_i^{\alpha_i - \alpha_{i-1}} \quad (2.5)$$

Ya que el valor de α_3 no está por completo determinado puede calcularse el valor de k_0 como función de α_3 , $k_0 = k_0(\alpha_3)$. Esto permite utilizar la expresión para regiones con diferente densidad.

Utilizando las Ecs. 2.4, 2.5 y los valores de la tabla 1, tras la integración se obtiene la ecuación

$$\frac{k_0}{\mathcal{M}_\star} = \left[c_0 + \frac{c_1}{2 - \alpha_3} (m_4^{2-\alpha_3} - m_3^{2-\alpha_3}) \right]^{-1} \quad (2.6)$$

donde

$$\begin{aligned} c_0 &= \int_{m_0}^{m_1} dm m^{1-\alpha_0} + m_1^{\alpha_1 - \alpha_0} \int_{m_1}^{m_2} dm m^{1-\alpha_1} + m_1^{\alpha_1 - \alpha_0} m_2^{\alpha_2 - \alpha_1} \int_{m_2}^{m_3} dm m^{1-\alpha_2} \\ c_1 &= m_1^{\alpha_1 - \alpha_0} m_2^{\alpha_2 - \alpha_1} \end{aligned}$$

con los valores numéricos $\log c_0 = -1,03 \pm 0,46$ y $\log c_1 = -1,39 \pm 0,48$ calculados numéricamente por integración Monte Carlo.

2.1.3. Historia de formación estelar (SFH)

La tasa de formación estelar² (SFR, por sus siglas en inglés) es la velocidad de transformación de masa de gas a masa estelar en una galaxia en función del tiempo. Se expresa en unidades de masa estelar formada por unidad de tiempo, siendo su expresión general

$$\frac{d\mathcal{M}_\star}{dt} = \varphi(t) \quad (2.7)$$

donde $\varphi(t)$ es la función que representa la SFR y \mathcal{M}_\star es la masa estelar galáctica transformada a partir de la masa gaseosa.

Definidas la SFR y la IMF se puede expresar la historia de formación estelar³ (SFH, por sus siglas en inglés) como

$$\psi(m, t) = \bar{\xi}(m)\varphi(t) \quad (2.8)$$

La integración de la Ec. 2.8 en un intervalo de tiempo y de masa resulta en la cantidad de estrellas formadas en el periodo (t_1, t_2) con masas comprendidas en el intervalo (m_1, m_2) .

$$N(m_1, m_2; t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} dt \varphi(t) \int_{m_1}^{m_2} dm \bar{\xi}(m)$$

²*Star-Formation Rate*

³*Star-Formation History*

Tabla II. **Tiempos en secuencia principal en función de la masa estelar**

m/M_{\odot}	τ_{MS} [Myr]	m/M_{\odot}	τ_{MS} [Myr]
30	4,9	1,5	2×10^3
15	10	1,0	1×10^4
9	22	0,5	3×10^4
5	68	0,1	1×10^7
3	240		

Fuente: Karttunen, H. *Fundamental Astronomy*. p. 245.

Para el caso del cálculo del número de remanentes estelares debe considerarse el tiempo requerido para la evolución natural de la estrella. Este tiempo será llamado $\tau_{MS}(m)$ y es el tiempo que una estrella pasa en la secuencia principal. La nueva expresión resulta

$$N(m_1, m_2; t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \int_{m_1}^{m_2} dt dm \varphi(t - \tau_{MS}(m)) \bar{\xi}(m) \quad (2.9)$$

Nótese la dependencia de τ_{MS} respecto a la masa. Esto se debe a que la evolución estelar depende de la masa de la estrella, siendo las estrellas más masivas las de menor tiempo de evolución. En la tabla II se muestran los tiempos de secuencia principal para diferentes masas estelares.

2.1.4. Factor de emisión

Como se discutió en la sección 1.2.1, los radiopulsares emiten radiación en un área espacialmente limitada. Gunn y Ostriker (1970) calcularon el tamaño de la región que emite el haz de radiación (llamada cilindro luminoso) utilizando la relación $W = W(P)$ de la población de radiopulsares galácticos. La conclusión es que el área que ocupa el haz es de 1/6 a 1/4 del área superficial del radiopulsar. Este valor es llamado factor de emisión⁴ y se utilizará como

$$\beta = 1/6 \tag{2.10}$$

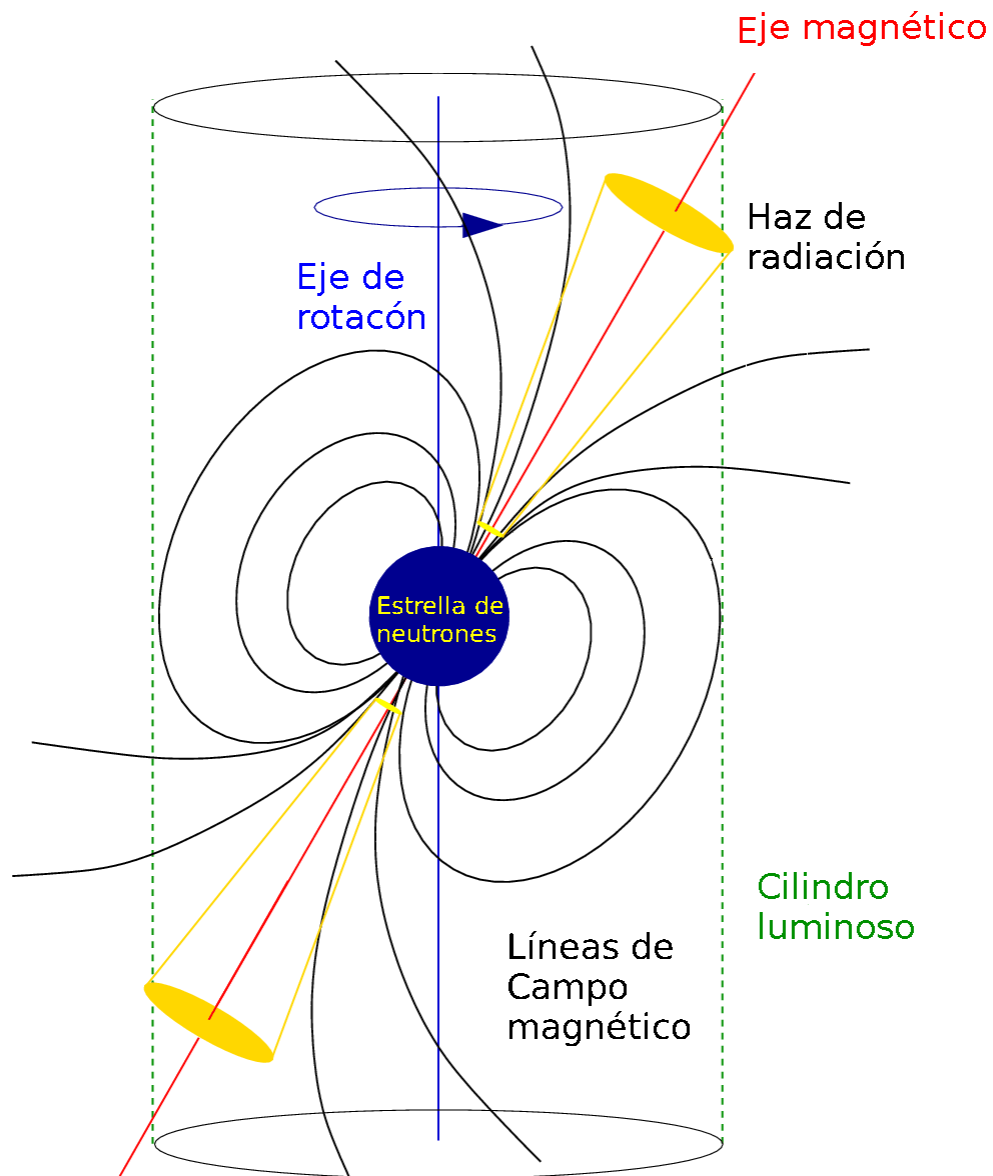
La interpretación del factor de emisión tiene dos consecuencias importantes

- Al cálculo de la luminosidad total debe multiplicársele este valor para obtener la luminosidad real del haz emitido.
- La población de radiopulsares observada–calculada es alrededor de β veces la población de estrellas de neutrones.

En la figura 6 se esquematiza un pulsar como un dipolo magnético en rotación radiando energía en un área específica de su superficie.

⁴*Beaming factor*

Figura 6. Esquema de un pulsar como un dipolo magnético



Fuente: Lorimer, D. R.; Kramer, M. *Handbook of Pulsar Astronomy*. p. 25.

2.1.5. Evolución temporal de un radiopulsar

El campo magnético de los pulsares varía en el tiempo, haciéndose menor según irradie energía. La forma de decaimiento depende del mecanismo radiativo considerado, en este caso se utiliza el modelo de pérdida de radiación de un dipolo magnético en rotación (Guun y Ostriker 1970). Se asume un decaimiento exponencial en el campo magnético inicial B_0 , de manera que

$$B(t) = B_0 e^{-t/\tau_m} \quad (2.11)$$

donde $\tau_m \sim 10^{6-7}$ y es un parámetro de evolución (Gusinov 1986). De la Ec. 1.2, resolviendo para P se obtiene

$$P(t) = \sqrt{P_0^2 + \frac{\tau_m B_0^2}{2C_B^2} (1 - e^{-2t/\tau_m})} \quad (2.12)$$

Cuando $t \rightarrow \infty$, utilizando la Ec. 1.2 en $B_0 = C_B(P_0 \dot{P}_0)^{1/2}$, se obtiene el valor máximo del periodo y los valores mínimos de \dot{P} y del campo magnético para el pulsar

$$\begin{aligned} P_{max} &= P_0 \sqrt{1 + \frac{\tau_m \dot{P}_0^2}{2P_0}} \\ \dot{P}_{min} &= 0 \\ B_{min} &= 0 \end{aligned}$$

2.2. Población de radiopulsares en la Vía Láctea

Una población de radiopulsares puede representarse en un diagrama bidimensional que muestra dos de sus propiedades físicas independientes. Para este caso se utilizan los valores de $\log P$ y $\log \dot{P}$ extraídos del ATNF (Manchester et al. 2005). La distribución de los valores de $\log P$ y $\log \dot{P}$ se pueden describir como dos distribuciones normales independientes una de otra (Lorimer y Kramer 2005), descritas por la media, la desviación estándar y un parámetro de escala (μ , σ y K respectivamente).

$$N(\log P) = \frac{K_P}{\sigma_P \sqrt{2\pi}} e^{-\left(\frac{\log P - \mu_P}{2\sigma_P^2}\right)^2} = K_P \mathcal{N}(\mu_P, \sigma_P) \quad (2.13)$$

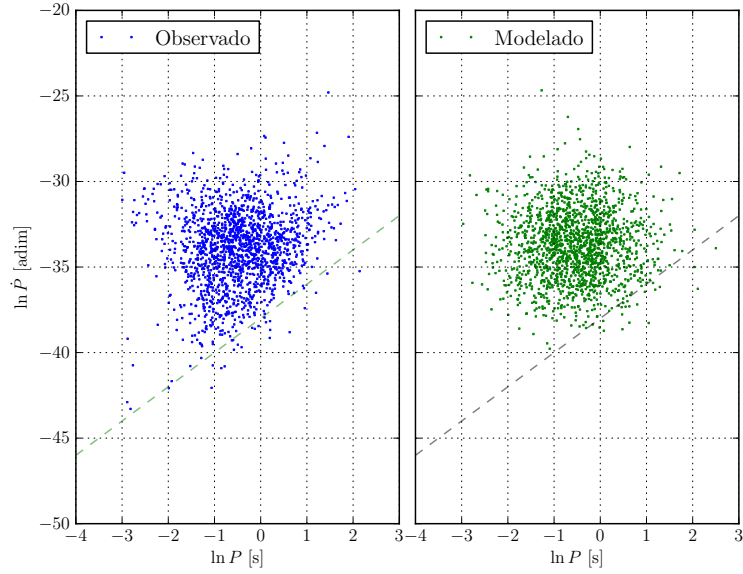
Para la construcción de estas distribuciones no se consideran los pulsares que forman parte de un sistema estelar múltiple, los pulsares de alta energía, los AXP (*Anomalous X-ray Pulsar*), así como los que tiene un $\dot{P} \geq 0$ y $P < 0,05$ s. Considerando las exclusiones anteriores se obtuvo una base de datos de 2 267 pulsares registrados en el ATNF de los que se utilizaron 1 727 ($\sim 75\%$).

Además se considera la *dead line*⁵. Fenomenológicamente, esta es la frontera que separa los pulsares que pueden radiar energía en radio de los pulsares que, de existir, no pueden hacerlo. La expresión de la *dead line* depende del modelo utilizado para la descripción de la emisión de radiación, en este caso se utilizó el SCLFM⁶ Ec. 2.14, ya que esta función es la que mejor concuerda con las observaciones (Zhang et al. 2000). En la figura 7 se muestra la comparación de los población observada

⁵Línea de la muerte

⁶*Space-charge-limited flow model* Modelo de flujo limitado por espacio y carga

Figura 7. Diagrama $\log P - \log \dot{P}$



Fuente: elaboración propia, con programa `atnfParameters.py`.

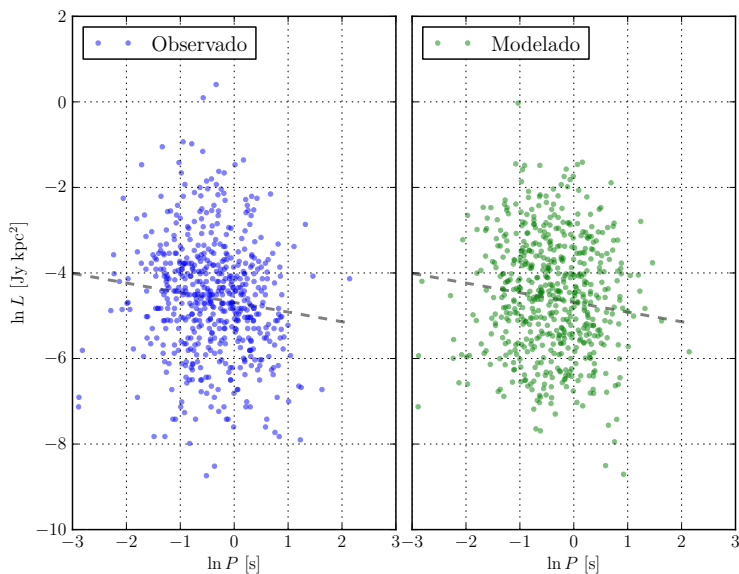
y una simulada por Monte Carlo según el modelo de la Ec. 2.13 para el diagrama $\log P - \log \dot{P}$

$$\log \dot{P} = 2 \log P - 15,52 \quad (2.14)$$

Para la distribución de luminosidad se utiliza la ecuación propuesta por Rubio-Herrera (2010) en la simulación de la población de pulsares en M 31

$$\log L(\log P) = a_L \log P + b_L + \mathcal{N}(\mu_L, \sigma_L) \quad (2.15)$$

Figura 8. **Diagrama** $\log P$ – $\log L$



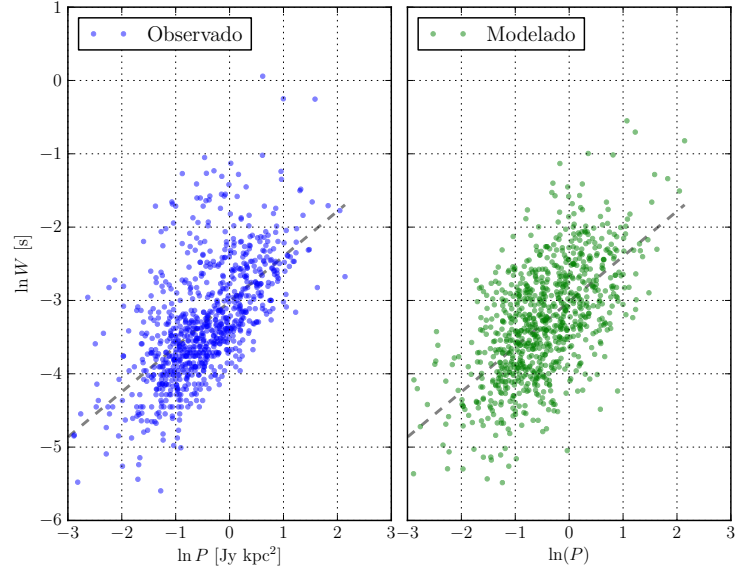
Fuente: elaboración propia, con programa `atnfParameters.py`.

En la distribución de ancho de pulso se utiliza una ecuación similar a la propuesta por Lorimer para el ancho de pulso intrínseco en el “Parkes Multi Beam Survey” (Lorimer et al. 2008), que tras algunas manipulaciones algebraicas, es

$$\log W(\log P) = a_W \log P + b_W + \mathcal{N}(\mu_W, \sigma_W) \quad (2.16)$$

Los valores de las constantes $a_{L,W}$, $b_{L,W}$ calculados se muestran en la tabla III. La aplicación del modelo y su comparación con los datos observados se muestran en las figuras 7, 8 y 9.

Figura 9. **Diagrama** $\log P$ – $\log W$



Fuente: elaboración propia, con programa `atnfParameters.py`.

Tabla III. **Parámetros estadísticos calculados de la población de radio-pulsares de la Vía Láctea**

Variable	K	μ	σ	a	b
$\log P$	201,40	-0,217	0,365	-	-
$\log \dot{P}$	737,55	-14,61	0,92	-	-
$\log L$	-	0	0,81	-0,41	-2,50
$\log W$	-	0	0,34	-3,69	0,60

Fuente: elaboración propia.

3. POBLACIÓN DE RADIOPULSARES EN LA GALAXIA ESFEROIDAL ENANA DE SCULPTOR

Considerando las Ecs. 2.3, 2.9 y 2.10 puede calcularse la cantidad de radiopulsares formados en una galaxia por medio de

$$N_T(t_f, \beta, \bar{\xi}(m), \varphi(t), Z(t)) = \beta \int_{t_0}^{t_f} \int_{m_{min}(Z(t))}^{m_{max}(Z(t))} dt dm \varphi(t - \tau_{MS}(m)) \bar{\xi}(m) \quad (3.1)$$

La Ec. 3.1 supone que se conoce la IMF, la SFR y la dependencia $Z = Z(t)$. En este caso se calcula el número total de pulsares generados N_T y el número de pulsares activos N_P transcurrido un tiempo t_f para SdSph. Se utilizan los valores reportados por de Boer (2012) de SFR, $[Fe/H]$ y $[\alpha/Fe]$ (véase tabla IV) y una IMF definida por partes con el parámetro α_3 variable en diferentes modelos (desde “modelo a” hasta “modelo m”). Adicionalmente se considera una variación ΔZ en $[Z]$. La variable w es la duración del periodo de formación estelar.

Para determinar $[Z]$ en función de $[Fe/H]$ y $[\alpha/Fe]$ se utilizó $Y = 0,24 + 2Z$ (Ibeling y Heger 2012) con la aproximación $Z \approx 0$, $Y \approx 0,24$. El cálculo se realizó por el programa creado por Valcarce et al. (2012)¹. Estas aproximaciones son válidas debido a la baja metalicidad de SdSph.

¹<http://www2.astro.puc.cl/pgpuc/FeHcalculator.php>

Tabla IV. SFH de SdSph

Parámetro	Valor									
Edad [Gyr]	13,00	12,00	11,00	10,00	9,00	8,00	7,00	6,00	5,00	
w [Gyr]	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
SFR [$\times 10^{-4} m_{\odot}/\text{yr}$]	27,50	19,50	11,00	8,00	5,50	2,50	2,00	1,75	1,00	
[Fe/H] [dex]	-2,60	-2,20	-1,80	-1,70	-1,50	-1,20	-1,10	-1,10	-1,00	
$[\alpha/\text{Fe}]$ [dex]	0,35	0,30	0,20	0,20	0,10	0,00	-0,05	-0,05	-0,10	
[Z] [dex]	-2,40	-2,02	-1,71	-1,61	-1,49	-1,26	-1,19	-1,19	-1,12	

Fuente: elaboración propia, datos tomados de de Boer, T. J. L. et al. *The star formation & chemical evolution timescales of two nearby dwarf spheroidal galaxies*. p. 60, 63, 70.

Tabla V. **Parámetros aleatorios de los modelos utilizados**

Parámetro	Distribución
τ_M [yr]	$\mathcal{U}(5,0; 50,0) \times 10^6$
τ_{MS} [yr]	$\mathcal{U}(7,0; 22,0) \times 10^6$
$\log c_0$ [adim]	$\mathcal{N}(-1,03; 0,46)$
$\log c_1$ [adim]	$\mathcal{N}(1,39; 0,48)$

Fuente: elaboración propia.

El método utilizado para el cálculo es una implementación Monte Carlo con parámetros aleatorios de $\log c_0$, $\log c_1$, τ_{MS} y τ_M (tabla V, Ecs. 2.6, 2.9, 2.11) a partir de una distribución de pulsares similar a la de la Vía Láctea (tabla III, Ec. 2.13) evolucionada hasta el tiempo t_f utilizando la ecuación de decaimiento del campo magnético (Ec. 2.11). El programa escrito para el caso (apéndice) se corrió 100 veces por cada modelo y se reportan en la tabla VI los valores medios y las desviaciones estándar (μ y σ , respectivamente) para cada cálculo.

Los resultados de estos cálculos para cada modelo se muestran en la tabla VI. La cantidad total de pulsares y la cantidad de pulsares activos como función de los parámetros t_f , α_3 y ΔZ se muestran en la figura 10.

De los resultados de la simulación puede concluirse que:

- La SFH de la SdSph es tan antigua que en estos momentos resultaría imposible encontrar un radiopulsar activo (panel esquina superior derecha, figura 10). Este comportamiento es debido al corto periodo de actividad estimado de un

pulsar, $\tau_m \sim 10^{6-7}$ yr, comparado con el último evento de formación estelar reportado (hace ~ 5 Gyr).

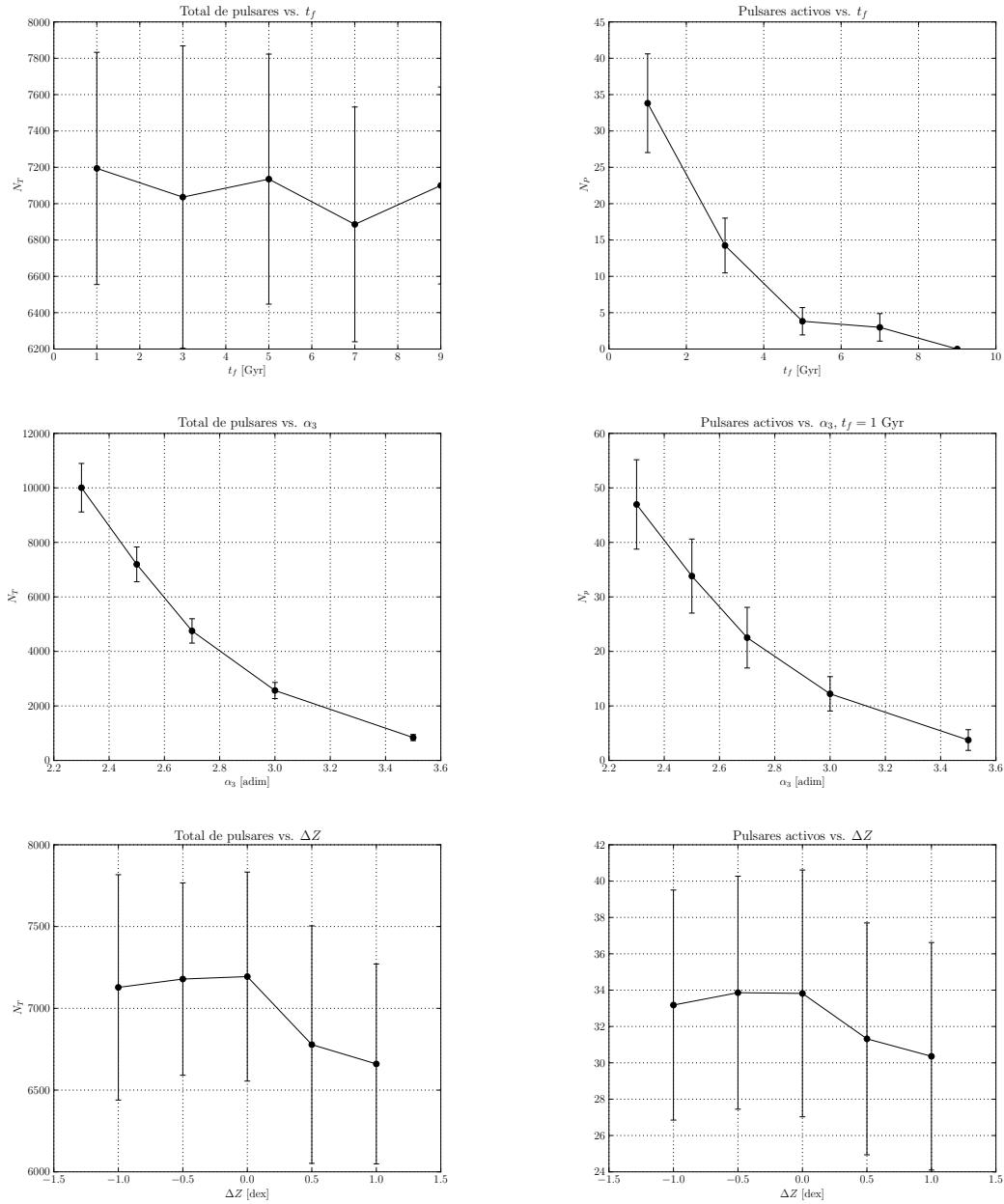
- El factor más influyente en la cantidad de pulsares formados es la IMF, por medio de α_3 (paneles centrales, figura 10). Las variaciones calculadas son de hasta un orden de magnitud en el intervalo (2,5; 3,5).
- La cantidad total de pulsares formados tiende a aumentar en cuanto disminuye la metalicidad de la población (esquina inferior izquierda, figura 10). Estas variaciones no son grandes comparadas con las incertezas del modelo.

Tabla VI. Resultados de los modelos (a-m) aplicados a SdSph

Modelo	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k	l	m
α_3	2,3	2,5	2,7	3,0	3,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
ΔZ	0	0	0	0	0	-1	-0,5	0,5	1,0	0	0	0	0
t_f	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	5	7	9
μ_{N_T}	10006	7194	4752	2566	839	7128	7179	6778	6660	7036	7135	6886	7100
σ_{N_T}	890	639	447	296	113	689	588	726	611	832	688	646	542
μ_{N_p}	46,96	33,82	22,52	12,22	3,74	33,18	33,86	31,32	30,36	14,24	3,82	2,98	0,0
σ_{N_p}	8,02	6,79	5,56	3,15	1,90	6,33	6,41	6,38	6,26	3,77	1,88	1,89	0,0
μ_P	-0,219	-0,170	-0,302	-0,158	-0,187	-0,200	-0,113	-0,206	-0,154	-0,306	-0,263	-0,347	0,000
σ_P	0,340	0,316	0,276	0,356	0,115	0,333	0,380	0,362	0,363	0,339	0,167	0,200	0,000
$\mu_{\dot{P}}$	-15,36	-15,29	-15,44	-15,11	-14,99	-15,40	-15,12	-15,28	-15,23	-15,45	-15,60	-15,68	0,00
$\sigma_{\dot{P}}$	0,77	0,73	0,57	1,05	0,92	0,82	0,87	0,64	0,82	1,01	0,67	0,83	0,00

Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Cantidad total de pulsares N_T y pulsares activos N_P en función de los parámetros t_f , α_3 y ΔZ



Fuente: elaboración propia.

4. DETECTABILIDAD DE RADIOPULSARES EN LA SdSph

Para evaluar la detectabilidad de una población de radiopulsares típicos en una galaxia enana se utilizó el método Monte Carlo por medio de la implementación de un programa de simulación escrito para el caso (Apéndice).

El trabajo del programa consiste en calcular la intensidad mínima que un radio pulsar, en un tiempo de observación t_d , debería tener según cada método de detectabilidad considerado (periodicidad Ec. 1.4 y pulsos Ec. 1.5) para ser detectado con diferentes instrumentos. Se reportan como detectables los objetos que superen este nivel de luminosidad.

Los radiotelescopios considerados son:

- GBT, Green Bank Telescope;
- WT, Westerbork Telescope;
- ATA-42, Allen Telescope Array (42 antenas simultáneas);
- ATCA (MB20), Australia Telescope Compact Array MB20 y;
- LOFAR, Low Frequency Array;
- SKA1-mid, Square Kilometre Array;

En la tabla VII se muestran los parámetros de los radiotelescopios necesarios para el cálculo y en la figura 11 se ilustran los instrumentos utilizados.

Figura 11. **Radio telescopios utilizados en la simulación**



Imágenes de los radiotelescopios GBT, WT; ATA (MB20), ATCA-42; LOFAR, SKA1-mid (concepción artística). Fuente: <http://commons.wikimedia.org/>

Tabla VII. **Características de los radiotelescopios utilizados**

Radiotelescopio	G [K/Jy]	T_{sys} [K]	n_p	ν [MHz]	$\Delta\nu$ [MHz]	β
GBT ^a	2.00	350	2	350	50	1.50
WT ^b	1.00	140	2	328	10	1.30
ATA-42 ^c	0.28	44	2	1420	100	1.16
ATCA (MB20) ^d	0.86	30	2	1420	300	1.16
LOFAR ^e	5.80	1000	2	140	25.6	1.00
SKA1-mid ^f	7.91	28	2	400	700	1.16

Fuente: elaboración propia con datos tomados de: ^aObserving with the GBT, ^bWSRT guide of observations, ^cA Radio Sky Surveys Project with the ATA, ^dATCA user's guide, ^eLOFAR numbers y ^fSKA Technical Description.

La población de radiopulsares utilizada es la de una galaxia como la SdSph según el modelo “c” $4\,752 \pm 447$ pulsares (tabla VI).

Los valores límites de S/N para la evaluación de la detectabilidad fueron ($S/N = 5$ y $S/N = 7$) con dos tiempos de observación ($t_d = 6$ min y $t_d = 12$ min) cada uno.

Las simulaciones de cada observación¹ se realizaron 100 veces y se reportan los valores medios y con su desviación en la tabla VIII de cada método de detección. Adicionalmente se consideró el efecto que tienen las fluctuaciones de intensidad, según la clasificación de los histogramas de luminosidades, en los dos métodos de detección considerados (figuras 12, 13, 14 y 15)

De los resultados obtenidos en cada simulación puede concluirse que:

¹Cada combinación de Radiotelescopio, S/N y t_d

- Los radiotelescopios GBT, WT, LOFAR, ATA-42 y ATCA (MB20) muestran baja sensibilidad a la detección de radiopulsares en una galaxia como Sculptor, con valores esperados de $\lesssim 1$ radio pulsar detectable por observación. Estos valores representan una cantidad detectable $< 0,02\%$ de la población total de la galaxia.
- El radiotelescopio SKA1-mid muestra alta sensibilidad a la detección de radiopulsares en una galaxia como Sculptor, con valores esperados $\gtrsim 50$ radio pulsares detectables por observación. Este valor representa una cota inferior de un $\sim 1\%$ de objetos detectables de la población total de la galaxia. Los valores más altos corresponden a $\sim 3,5\%$ de objetos detectables.
- El método de búsqueda por pulsos individuales favorece la detectabilidad de radio pulsares con histogramas que siguen una ley de potencia con un índice $\alpha < 2$ y en menor medida los de distribuciones Log-normal y ley de potencia con $\alpha > 2$.
- Las búsquedas por periodicidad muestran un escaso desempeño, casi nulo, en la detectabilidad de pulsares con instrumentos de baja sensibilidad, en cambio en SKA1-mid el caso es diferente, ya que la mayoría de pulsares detectados se hace por medio de detectabilidad por periodicidad.

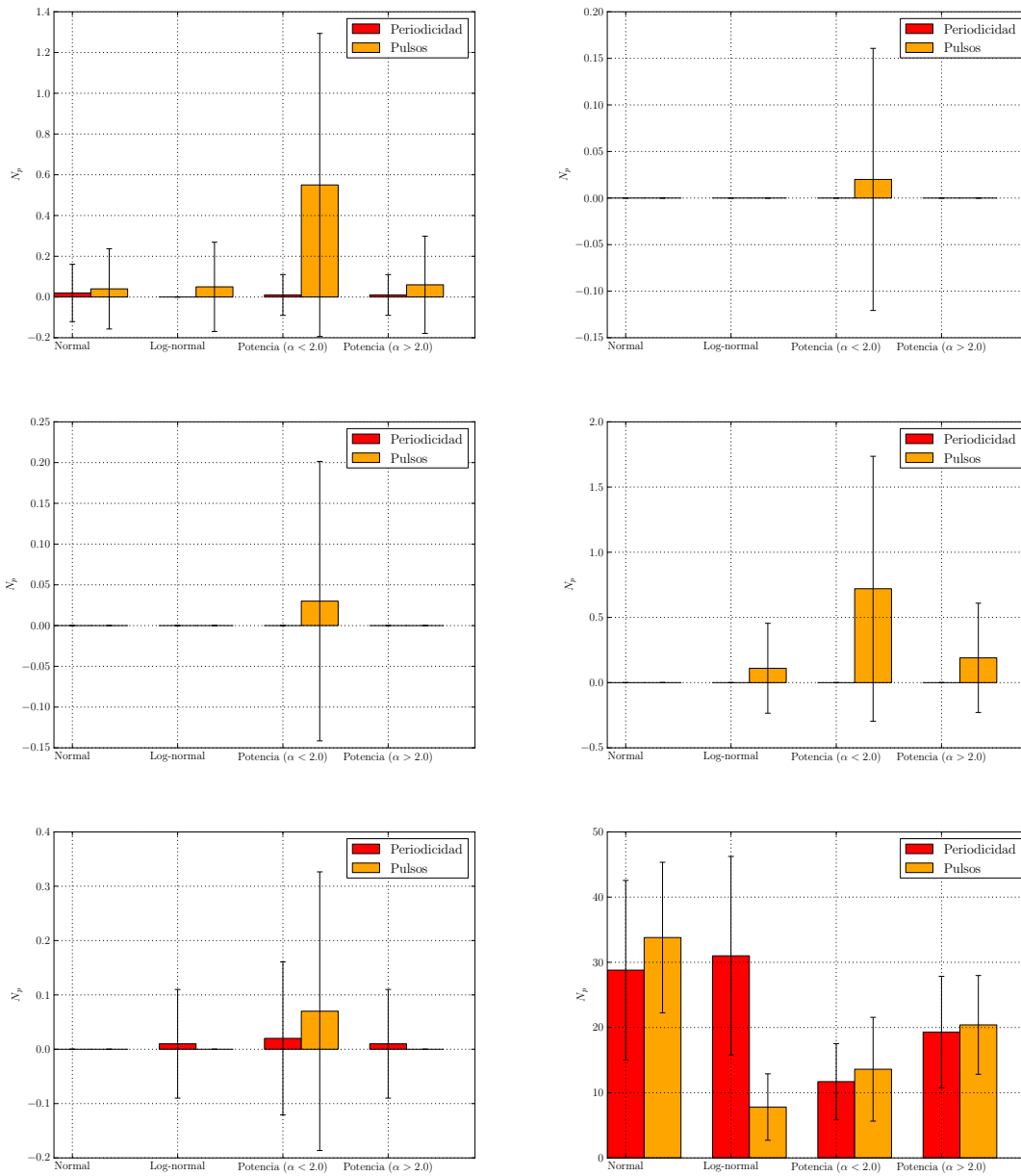
Tabla VIII. Resultados de observaciones con diferentes radiotelescopios

Parámetros	N_{Det}^a	GBT	WT	LOFAR	ATA-42	MB20	SKA1-mid
$S/N = 5$	N_{Per}	$0,04 \pm 0,34$	-	$0,04 \pm 0,34$	-	-	$90,8 \pm 42,2$
$t_d = 6$ min	N_{Pul}	$0,70 \pm 1,14$	$0,02 \pm 0,14$	$0,07 \pm 0,26$	$0,03 \pm 0,17$	$1,02 \pm 1,76$	$75,6 \pm 33,0$
$S/N = 5$	N_{Per}	$0,05 \pm 0,37$	-	$0,09 \pm 0,52$	-	-	$112,3 \pm 54,7$
$t_d = 12$ min	N_{Pul}	$0,66 \pm 1,30$	$0,03 \pm 0,17$	$0,03 \pm 0,17$	-	$1,48 \pm 2,09$	$56,1 \pm 32,1$
$S/N = 7$	N_{Per}	$0,01 \pm 0,10$	-	-	-	-	$52,5 \pm 30,7$
$t_d = 6$ min	N_{Pul}	$0,38 \pm 1,00$	$0,02 \pm 0,14$	$0,07 \pm 0,26$	-	$0,66 \pm 1,31$	$38,9 \pm 24,1$
$S/N = 7$	N_{Per}	$0,03 \pm 0,24$	-	$0,02 \pm 0,2$	-	-	$89,1 \pm 52,6$
$t_d = 12$ min	N_{Pul}	$0,52 \pm 1,00$	$0,01 \pm 0,10$	$0,02 \pm 0,14$	-	$0,91 \pm 1,61$	$46,4 \pm 31,2$

Fuente: elaboración propia.

^a- significa que no hay pulsares detectables.

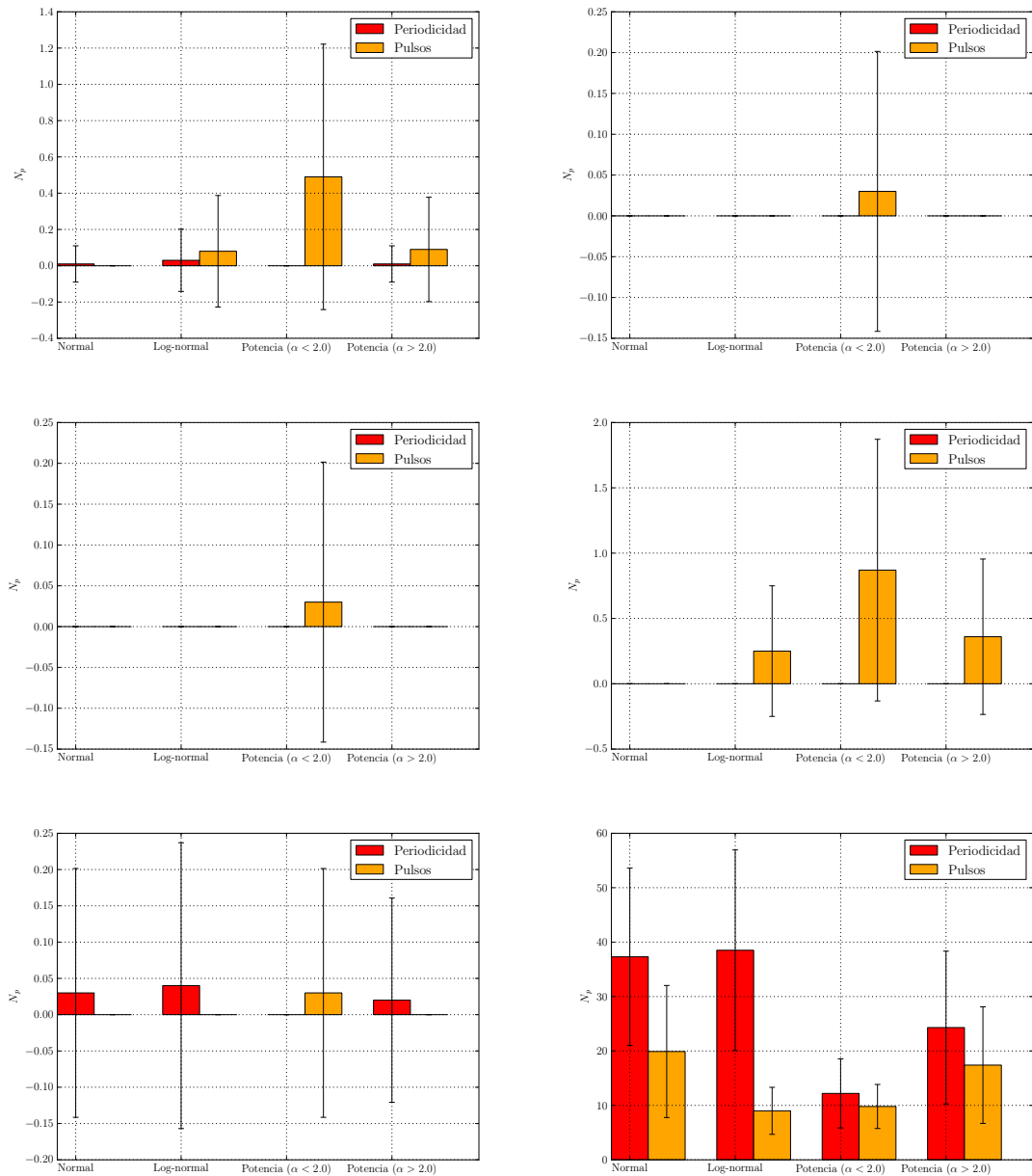
Figura 12. Radiopulsares detectados ($S/N = 5$, $t_d = 6$ min)



Radiotelescopios GBT, WT; ATA (MB20), ATCA-42; LOFAR, SKA1-mid.

Fuente: elaboración propia.

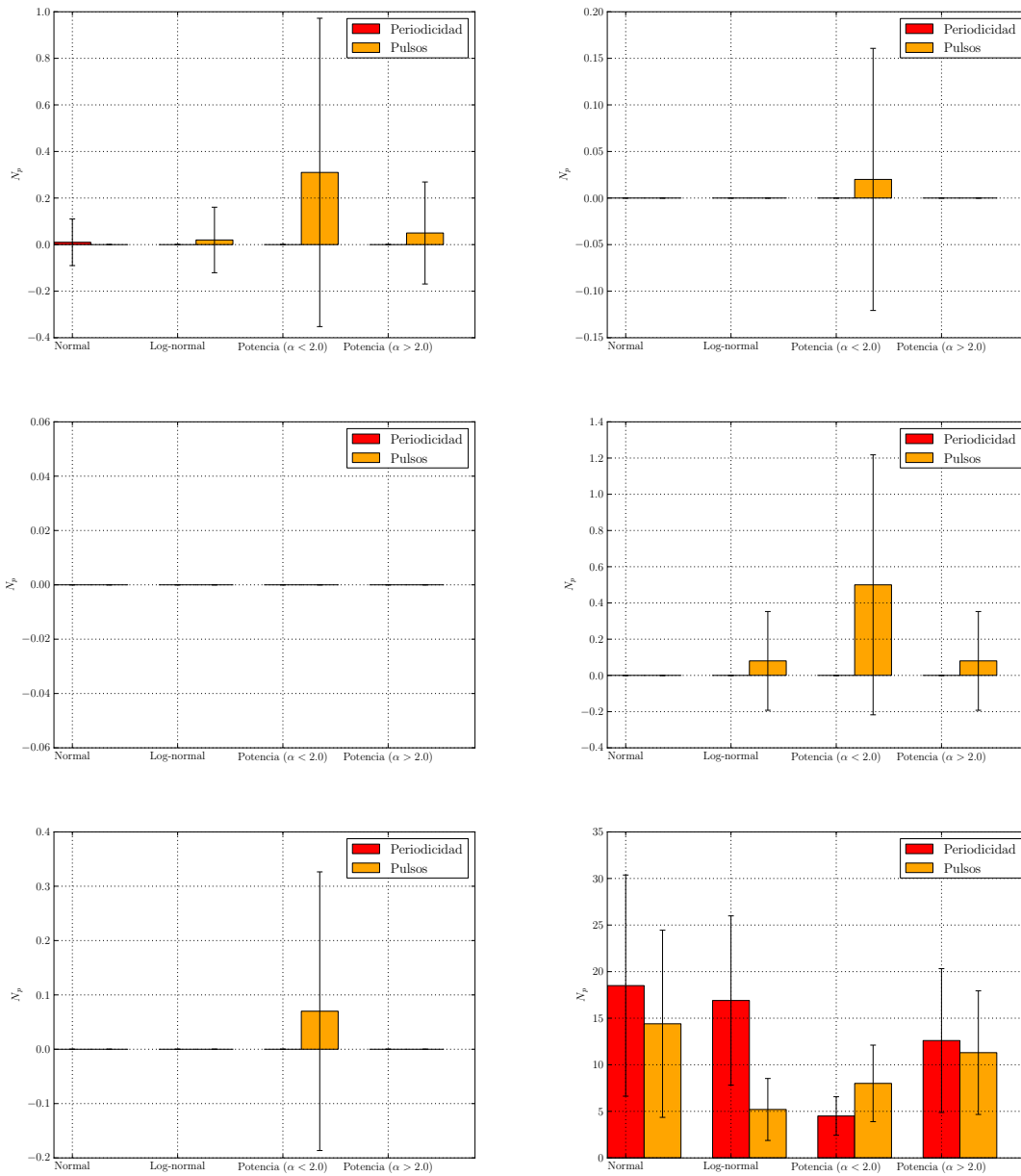
Figura 13. Radiopulsares detectados ($S/N = 5$, $t_d = 12$ min)



Radiotelescopios GBT, WT; ATA (MB20), ATCA-42; LOFAR, SKA1-mid.

Fuente: elaboración propia.

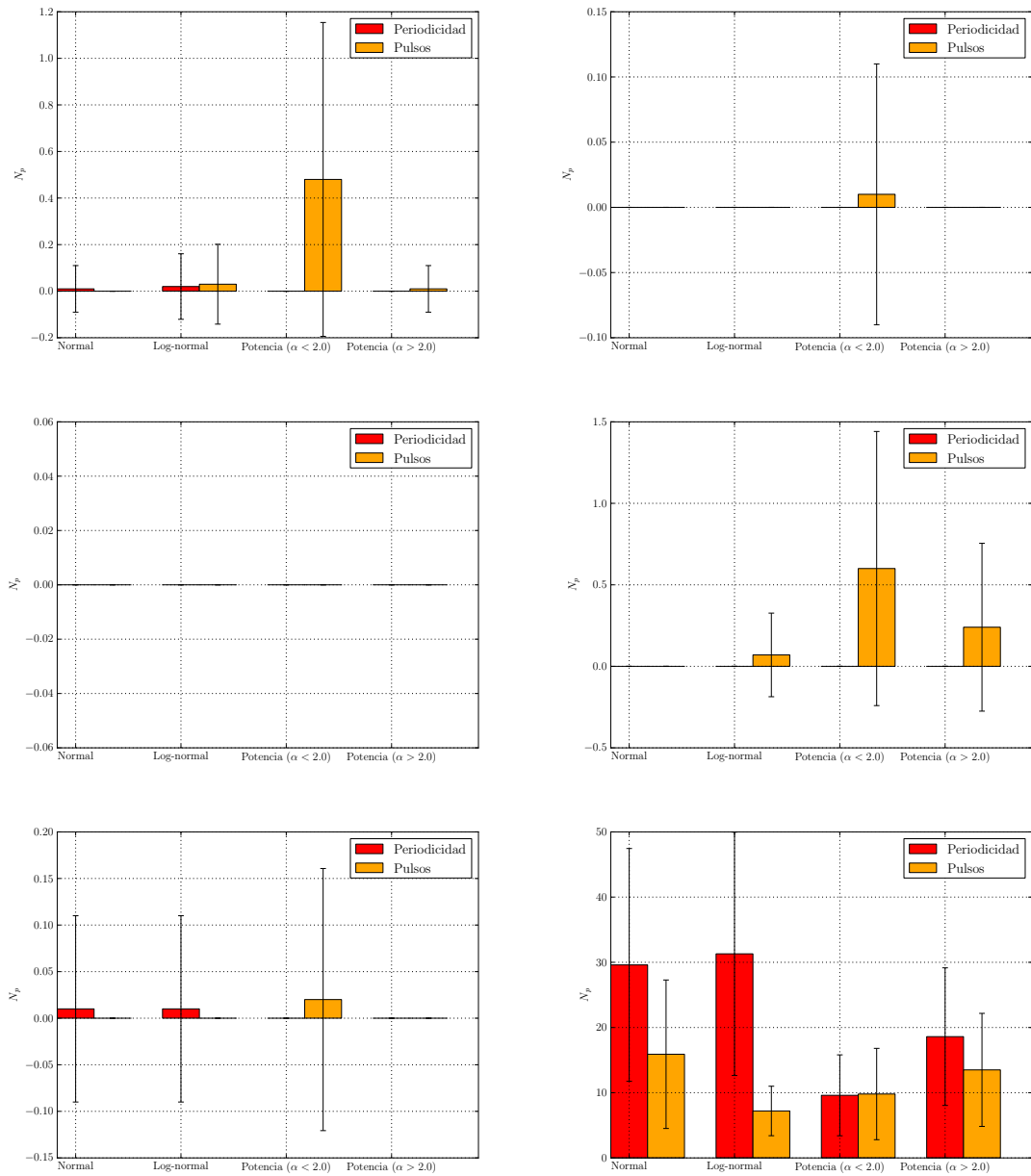
Figura 14. Radiopulsares detectados ($S/N = 7$, $t_d = 6$ min)



Radiotelescopios GBT, WT; ATA (MB20), ATCA-42; LOFAR, SKA1-mid.

Fuente: elaboración propia..

Figura 15. Radiopulsares detectados ($S/N = 7$, $t_d = 12$ min)



Radiotelescopios GBT, WT; ATA (MB20), ATCA-42; LOFAR, SKA1-mid.

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. Se utilizó un modelo numérico para establecer la cantidad de estrellas de neutrones detectables como radio pulsares en la galaxia esferoidal enana de Sculptor y se evaluó su detectabilidad con los radiotelescopios Green Bank Telescope (GBT), Westerbork Telescope (WT), Allen Telescope Array (ATA-42), Australia Telescope Compact Array Multi Beam (ATCA), Low Frequency Array (LOFAR) y Square Kilometre Array (SKA1-mid).
2. La cantidad de radio pulsares generados en la galaxia esferoidal enana de Sculptor depende de la forma de la IMF considerada, variando desde aproximadamente $10\,000 \pm 900$ con una IMF que favorece el nacimiento de estrellas masivas hasta unos 840 ± 110 para una IMF que no favorece estrellas masivas.
3. La cantidad de radio pulsares generados en una galaxia es poco afectada por variaciones de hasta un factor de 10 en la metalicidad. Aunque la tendencia de la cantidad de radiopulsares es a aumentar en cuanto disminuye la metalicidad de la población, la variación es mínima y es comparable con las incertezas del modelo.
4. La cantidad de radio pulsares típicos activos en la galaxia esferoidal enana de Sculptor es insignificante. Esto se debe al corto periodo de actividad de un pulsar, estimado en 10^{6-7} yr, comparado con el último evento de formación estelar que fue hace ~ 5 Gyr.

5. Los radiotelescopios GBT, WT, LOFAR, ATA-42 y ATCA muestran baja sensibilidad a la detección de radiopulsares en una galaxia como Sculptor, con valores esperados de $\lesssim 1$ radio pulsar detectable por observación. Estos valores representan una cantidad detectable $< 0,02\%$ de la población total de la galaxia.
6. El radiotelescopio SKA1-mid muestran alta sensibilidad a la detección de radiopulsares en una galaxia como Sculptor, con valores esperados $\gtrsim 50$ radio pulsares detectables por observación. Este valor representa una cota inferior de un $\sim 1\%$ de objetos detectables de la población total de la galaxia. Los valores más altos corresponden a $\sim 3,5\%$ de objetos detectables.
7. El método de búsqueda por pulsos individuales favorece la detectabilidad de radio pulsares con histogramas que siguen una ley de potencia con un índice $\alpha < 2$ y en menor medida los de distribuciones Log-normal y ley de potencia con $\alpha > 2$.
8. Las búsquedas por periodicidad muestran un escaso desempeño, casi nulo, en la detectabilidad de pulsares con instrumentos de baja sensibilidad, en cambio en SKA1-mid el caso es diferente, ya que la mayoría de pulsares detectados se hace por medio de una búsqueda por periodicidad.

RECOMENDACIONES

1. La presencia de radiopulsares activos actualmente en SdSph indicaría procesos de formación diferentes a eventos SNeII. El único mecanismo de formación de radiopulsares considerado en los cálculos de este trabajo es el de SNeII ya que es aceptado como un mecanismo validado por medio de observaciones, esto no significa que otros mecanismos no sean posibles. Uno de los procesos de formación que podría probarse es el de “colapso inducido por acreción”², donde una estrella enana blanca acreta suficiente masa de la estrella compañera en un sistema estelar doble de manera que podría colapsar en una estrella de neutrones. Por los motivos anteriormente discutidos, es importante la observación de SdSph en búsqueda de radiopulsares activos ya que de encontrarse darían información valiosa sobre su formación.
2. Considerando la sensibilidad estimada para el radiotelescopio SKA1–mid con tiempos de integración ~ 10 min resulta conveniente realizar una búsqueda de radiopulsares en SdSph y en otras galaxias satélites de la Vía Láctea utilizando este instrumento.
3. Aunque en este trabajo fue considerada la SdSph como base de la simulación, sería provechoso aplicar los mismos cálculos para otras galaxias. Entre las galaxias propuestas podría incluirse la galaxia esferoidal enana de Fornax que presenta características similares a la SdSph, aunque con su último periodo de formación estelar hace $\sim 0,25$ Gyr.

²*Accretion induced collapse*

BIBLIOGRAFÍA

1. ASTRON. *LOFAR numbers* [en línea] <lofar.org/about-lofar/system/lofar-numbers/lofar-numbers>. [Consulta: 20 de agosto de 2013].
2. ———. *WSRT guide of observations* [en línea] <astron.nl/radio-observatory/astronomers/wsrt-guide-observations/3-telescope-parameters-and-array-configuration>. [Consulta: 20 de agosto de 2013].
3. ATNF. “ATCA user’s guide” [en línea] <narrabri.atnf.csiro.au/observing/users_guide/html/new_atug.pdf>. [Consulta: 20 de agosto de 2013].
4. BAADE, W.; ZWICKY, F. “Remarks on Super-Novae and Cosmic Rays”. *Physics Review*. 1934, vol. 45, p. 138.
5. BEKKI, Kenji. “Simulating galaxy evolution with a non-universal stellar initial mass function”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2013, vol. 436, Issue 3, p. 2254-2275.
6. BESKIN, V. S., et al. *Physics of the pulsar magnetosphere* UK: Cambridge University Press, 1993. 408 p. ISBN: 978-0-521-03253-7
7. CAIRNS, I. H.; JOHNSTON, S.; DAS, P. “Intrinsic variability of the vela pulsar: lognormal statistics and theoretical implications”. *Astrophysical Journal*. 2001, vol. 563, p. L65.

8. CARROL, B.; OSTILE, D. *An Introduction to Modern Astrophysics*. 2nd ed. CA, USA: Addison-Wesley, 2007. 1278 p. ISBN: 0-321-44284-9
9. CHANDRASEKHAR, S. "Stellar configurations with degenerate cores (Second paper)". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 1935, vol. 95, p. 676-693.
10. CONDON, J. J.; RANSOM, S. M. *Essential Radio Astronomy* [en línea] <<http://www.cv.nrao.edu/course/astr534/ERA.shtml>>. [Consultado: 09 de septiembre de 2013].
11. DE BOER, T. J. L., et al. *The Star Formation & Chemical Evolution timescales of two nearby dwarf spheroidal galaxies*. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam, 2012. 156 p. ISBN: 978-90-367-5422-4
12. FRIGG, Roman; HARTMANN, Stephan. "Models in Science". ZALTA, Edward N. (ed). "The Stanford Encyclopedia of Philosophy". (Fall 2012 ed.). [en línea] <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2012/entries/models-science/>>. [Consulta: 20 de agosto de 2013].
13. GOLD, T. "Rotating Neutron Stars as the Origin of the Pulsating Radio Sources". *Nature*. 1968, vol. 218, p. 731-732.
14. GUNN, J. E.; OSTRIKER, J. P. "On the Nature of Pulsars. III. Analysis of Observations". *Astrophysical Journal*. 1970, vol. 160, p. 979.
15. GUSEINOV, O. H.; YUSIFOV, I. M. "Pulsar evolution". *Soviet Astronomy*. 1986, vol. 30, p. 161-165.

16. HANKIS, T. H.; RICKETT, B. J. "Frequency dependence of pulsar profiles". *Astrophysical Journal, Part 1*. 1975, vol. 311, p. 684-693.
17. HEGER, A., et al. "The evolution and explosion of massive stars". *Reviews of Modern Physics*. 2002, vol. 74, Issue 4, p. 1015-1071.
18. HESSE, K. H.; WIELEBINSKY, R. "Pulse Intensity Histogram of Pulsars". *Astronomy & Astrophysics*. 1973, vol. 31, p. 409-413.
19. HEWISH, A., et al. "Observation of a Rapidly Pulsating Radio Source". *Nature*. 1967, vol. 217, p. 709.
20. HUBBLE, E. "Extragalactic Nebulae". *Astrophysical Journal*. 1926 vol. 64, p. 321-329.
21. IBELING, D.; HEGER, A. "The Metallicity Dependence of the Minimum Mass for Core-collapse Supernovae". *The Astrophysical Journal Letters*. 2013, vol. 765, Issue 2, p. L43.
22. KARTTUNEN, Hanun, et al. *Fundamental Astronomy* 5th ed. Helsinki: Springer, 2006. 510 p. ISBN: 978-3-540-34143-7
23. KRAMER, M. "Pulsars". *EAS Publications Series*. 2005, vol. 15, p.219-241.
24. KROUPA, Pavel. "The Initial Mass Function of stars: Evidence for uniformity in variable systems". *Science*. 2002, Volume 295, Issue 5552, p. 82-91.

25. LORIMER, D. R. “Radio Pulsar Statistics”. BAYKAL, A. et al. “The Electromagnetic Spectrum of Neutron Star” NATO science series II: Mathematics, physics and chemistry”. Proceedings of the 6th NATO ASI series, vol. 210. Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2005. ISBN: 978-4020-3861-5.
26. LORIMER, D., et al. “The Parkes multibeam pulsar survey: VI. Discovery and timing of 142 pulsars and a Galactic population analysis”. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2006, vol. 372, Issue 2, p. 777-800.
27. LORIMER, D.; KRAMER, M. *Handbook of Pulsar Astronomy*. UK: Cambridge University Press, 2005. 301 p. ISBN: 9-78052-18282-39
28. LYNE, A. G., et al. “The discovery of a millisecond pulsar in the globular cluster M 28”. *Nature*. 1987, vol. 328, p. 399-401.
29. MANCHESTER, R. N. et al. “The ATNF Pulsar Catalogue”. *Astrophysical Journal*. 2005, vol. 129, (1993-2006).
30. MARON, O., et al. “Pulsar spectra of radio emission”. *Astronomy and Astrophysics Supplement*. 2000, vol.147, p.195-203.
31. McCULLOCH, P. M., et al. “A radio pulsar in the Large Magellanic Cloud”. *Nature*. 1983, vol. 303, p. 307-308.
32. McLAUGHLIN M. A.; CORDES J. M. “Searches for giant pulses from extragalactic pulsars”. *The Astrophysical Journal*. 2003, vol. 596, Issue 2, p. 982-996.

33. MO, H.; VAN DEN BOSCH, F.; WHITE, S. *Galaxy Formation and Evolution*. UK: Cambridge University Press, 2010. 820 p. ISBN: 13 978-0-511-72962-1
34. NRAO. “Observing with the GBT” [en línea] <science.nrao.edu/facilities/gbt/observing/GBTog.pdf>. [Consulta: 20 de agosto de 2013].
35. OPPENHEIMER, J. R.; VOLKOFF, G. M. “On Massive Neutron Cores”. *Physical Review*. 1934, vol. 55 (4), p. 374–381.
36. RUBIO–HERRERA, Eduardo A., et al. *Galactic and Extragalactic Searches for Pulsars and Radio Transients*. Amsterdam: Universiteit van Amsterdam, 2010. 126 p.
37. SALPETER, Edwin E. “The Luminosity Function and Stellar Evolution”. *Astrophysical Journal*. 1955, vol. 121, p.161-170.
38. SKA Organisation. “SKA Technical Description” [en línea] <skatelescope.org/wp-content/uploads/2013/09/CSP/_Technical/_Description.pdf>. [Consulta: 20 de agosto de 2013].
39. SOBOL’, Ilya M. *A Primer for the Monte Carlo Method* 3rd ed. FL, USA: CRC Press, 1994. 107 p. ISBN: 0-8493-8673-X
40. SPARK, L. S.; GALLAGER III, J. S. *Galaxies in the Universe: An Introduction* 2nd ed. UK: Cambridge University Press, 2007. 431 p. ISBN: 13 978-0-511-29472-3

41. SPRINGEL, Volker, et al. "Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars". *Nature*. 2005, vol. 435, Issue 7042, p. 629-636.
42. TOLMAN R.C. "Static Solutions of Einstein's Field Equations for Spheres of Fluid". *Physical Review*. 1939, vol. 55 num 4, p. 364-373.
43. UC BERKELEY. "A Radio Sky Surveys Project with the ATA" [en línea] <astro.berkeley.edu/gbower/RSS/rfv3.pdf>. [Consulta: 20 de agosto de 2013].
44. ULAM, S.; METROPOLIS, N. "The Monte Carlo method". *Journal of American Statistical Association*. 1949, vol. 44, p. 247-250.
45. VALCARCE, A. A. R.; CATELAN, M.; SWEIGART, A. V. "Effects of helium enrichment in globular clusters. I. Theoretical plane with PG-PUC stellar evolution code". *Astronomy & Astrophysics*. 2012, vol. 547, id.A5.
46. VAN DEN BERGH, Sidney. "Globular Clusters and Dwarf Spheroidal Galaxies". *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (letters)*. 2007, vol. 385 (1), p. L20.
47. YAKOVLEV D. G. "Lev Landau and the conception of neutron stars". [en línea] <<http://arxiv.org/abs/1210.0682v1>> [Consultado: 15 de julio de 2013].

48. ZHANG, Bing; HARDING, Alice K.; MUSLINOV, Alexander G. "Radio Pulsar Death Line Revisited: Is PSR J2144-3933 Anomalous?". *The Astrophysical Journal*. 2000, vol. 531 num 2, p. L135-L138.

APÉNDICE: DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN

Hardware y software utilizados

La simulación se realizó por medio de una serie de programas manejados por un script en BASH en una computadora de escritorio con doble núcleo AMD E-350 (1.75 GHz) con 4 GB de RAM con el sistema operativo Fedora 17 (x86_64). Los programas están escritos en PYTHON 2.6 utilizando los paquetes: `numpy` para la generación de números aleatorios; `scipy` para las rutinas numéricas; `parallelpython` (`pp`) para utilizar opciones de paralelización.

Los programas escritos son:

- `atnfParameters.py`: calcula los parámetros estadísticos de la población de radiopulsares de la Vía Láctea.
- `clasesPulsar.py`: Define el comportamiento de una población estelar, de un radiopulsar, de un radiotelescopio (inclusive los métodos de detección).
- `simPulsar.py`: Implementa las relaciones entre los objetos definidos en el archivo `ClasesPulsar.py`.
- `parallel_simPulsar.py`: Ejecuta el programa `simPulsar.py` en paralelo.
- `master_simPulsar.sh`: Prepara, maneja y ejecuta los resultados del programa `parallel_simPulsar.py`.