

**ESTRUCTURA ESTELAR DE OBJETOS COMPACTOS CON UNA  
ECUACIÓN DE ESTADO NUMÉRICA**

DAVID LEONARDO RAMOS SALAMANCA

ESCUELA DE FÍSICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA  
2018

**ESTRUCTURA ESTELAR DE OBJETOS COMPACTOS CON UNA  
ECUACIÓN DE ESTADO NUMÉRICA**

DAVID LEONARDO RAMOS SALAMANCA

PROPUESTA DE TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE FÍSICO

DIRECTOR:

LUIS A. NÚÑEZ DE VILLAVICENCIO MARTÍNEZ

ESCUELA DE FÍSICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
BUCARAMANGA

2018

# Resumen

**Título:** Estructura estelar de objetos compactos con una ecuación de estado numérica<sup>1</sup>

**Autor:** David Leonardo Ramos Salamanca<sup>2</sup>

**Palabras clave:** Estructura estelar, ecuación de estado numérica

The abstract should be short, stating what you did and what the most important result is. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

---

<sup>1</sup>Propuesta de trabajo de grado

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias. Escuela de física. Director: Luis A. Núñez de Villavicencio Martínez

# Abstract

**Title:** Stellar structure of compact objects with a numerical equation of state<sup>1</sup>

**Author:** David Leonardo Ramos Salamanca<sup>2</sup>

**Keywords:** Stellar structure, numerical equation of state

The abstract should be short, stating what you did and what the most important result is. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet.

---

<sup>1</sup>Bachelor thesis

<sup>2</sup>Facultad de Ciencias. Escuela de física. Adviser: Luis A. Núñez de Villavicencio Martínez

# Contenido

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>1</b>
1.1	Resumen de evolución estelar . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Marco teórico</b>	<b>3</b>
2.1	Estructura estelar Newtoniana . . . . .	3
2.2	Estructura estelar relativista . . . . .	3
2.3	Estructura interna de objetos compactos y ecuaciones de estado . . . . .	4
2.4	Criterios de estabilidad . . . . .	4
2.4.1	Condición de estabilidad de Harrison-Zeldovich-Novikov . . . . .	4
2.4.2	Condición de estabilidad por convección adiabática . . . . .	4
<b>3</b>	<b>Planteamiento del problema</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Objetivos</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Metodología</b>	<b>7</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>8</b>

# Introducción

---

Los objetos compactos (también llamados estrellas compactas) son el residuo de la vida luminosa de las estrellas, llamados así porque su tamaño es significativamente más pequeño que el de una estrella normal/en la secuencia principal con una masa similar, estos objetos pueden alcanzar densidades superiores a la densidad de saturación nuclear ( $\rho_0 = 2.3 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3$ ) y a las que los potenciales gravitacionales son tan grandes que la relatividad general es importante para determinar su estructura (exceptuando a las enanas blancas).

**Remark:** Quizá sea bueno introducir la clasificación de una

Como remanentes de estrellas, vale la pena discutir a grandes rasgos el proceso de formación y evolución estelar antes de estudiar a mayor profundidad la estructura de los objetos compactos, ya que permitirá tener una idea general de los procesos que llevan a una estrella a su destino final.

**Todo:** Pulir justificación

## 1.1 Resumen de evolución estelar

Las estrellas son formadas a partir de nubes de gas interestelar, compuestas en su mayoría de hidrógeno molecular, que debido a algún tipo de perturbación (como una onda de choque) comienzan a colapsar sobre ellas mismas gravitacionalmente. La energía gravitacional es convertida en calor por la contracción y si la temperatura incrementa lo suficiente ( $T \approx 10^7 \text{ K}$ , punto de ignición para la fusión de hidrógeno a helio), con ayuda de la contracción adicional causada por la pérdida de energía por radiación, la fusión se convierte en la fuente de energía principal y la presión termal y de radiación balancearán la gravedad, permitiendo así que la estrella se forme [1].

Las reacciones nucleares pueden sostener la estrella por un gran periodo de tiempo (de millones a billones de años, dependiendo de la masa de la estrella) en lo que se conoce como su fase de secuencia principal, llamada así porque las estrellas en esta etapa forman una secuencia mono-paramétrica (ignorando la composición química), cuyo parámetro es la masa estelar, en el diagrama de Hertzsprung-Russell (ver Figura 1.1). Las estrellas pasan la mayor parte de su vida luminosa en este estado, razón por la cual la mayoría de estrellas son encontradas en la secuencia principal, hasta que después de un tiempo característico el hidrógeno es extinguido/consumido/usado casi en su totalidad dejando un núcleo de Helio y da inicio a una siguiente etapa de fusión, de Helio a Carbono, el proceso se repite a lo largo de varias etapas de combustión (carbono, neón, oxígeno, magnesio y silicio) [2].

**Todo:** Revisar el orden del ciclo y por qué algunos elementos se saltan

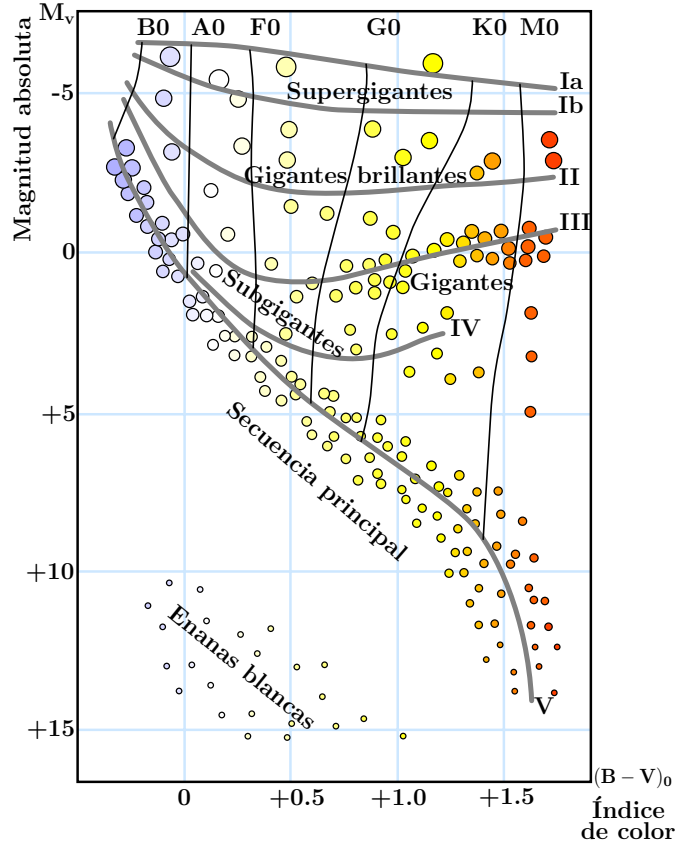


Figura 1.1: Diagrama Hertzsprung-Russell

**Todo:** Ajustar nomenclatura y valores del diagrama. Incluir cita.

El ciclo de combustión termina al alcanzar el hierro, debido a que la energía de enlace por nucleón tiene su valor máximo para el hierro y la fusión deja de ser exotérmica. Qué tanto avanza una estrella en este ciclo dependerá de la masa estelar, sólo estrellas masivas ( $M \geq 8M_{\odot}$ ) llegan al hierro/final, en este punto tendrán una estructura en forma de cascarones de materia que rodean al núcleo de hierro. Sin la energía producida por la fusión nuclear la compresión de la gravedad no tiene qué la equipare y la estrella colapsa, las capas de materia caen casi libremente hacia el núcleo desencadenando, a través de mecanismos complejos y no enteramente comprendidos, una supernova de colapso de núcleo [3] [4].

El núcleo colapsado o proto-objeto compacto inicia un proceso de enfriamiento y reajustamiento estructural hasta que alcanza su composición de equilibrio de neutrones, protones, hiperones, leptones y posiblemente quarks, altamente degenerados, es decir, en un estado tal que han ocupado los niveles de energía más bajos disponibles. El objeto compacto formado será sostenido por la presión de degeneración de las partículas degeneradas que lo compongan [1]. Vale la pena aclarar que se acostumbra llamar a todos estos objetos estrellas de neutrones, aunque su composición puede ser tan variada como se mencionó antes.

**Todo:** Ya que se sabe qué es un objeto compacto, hablar a grandes rasgos de la estructura global de estos y la dependencia de la ecuación de estado, para darle paso a mi problema.

**Todo:** Papers seminales en estructura global y algunos de ecuaciones de estado.

# Marco teórico

---

## 2.1 Estructura estelar Newtoniana

**Remark:** Una de las razones para incluir el caso Newtoniano es que permite interpretar luego las ecuaciones obtenidas en relatividad general.

$$M(r) = \int_0^r 4\pi r^2 \rho dr; \quad dM(r) = 4\pi r^2 \rho dr \quad (2.1)$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{GM(r)}{r^2} \rho \quad (2.2)$$

## 2.2 Estructura estelar relativista

$$ds^2 = e^{2\nu(r)} dt^2 - e^{2\lambda(r)} dr^2 - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \quad (2.3)$$

$$G_\mu^\nu = R_\mu^\nu - \frac{1}{2} g_\mu^\nu R = 8\pi T_\mu^\nu \quad (2.4)$$

$$T^{\mu\nu} = -P g^{\mu\nu} + (P + \rho) u^\mu u^\nu$$

$$g_{\mu\nu} u^\mu u^\nu = 1 \quad (2.5)$$

**Todo:** Glendennig para aclarar lo que se hace con el tensor.

$$T_0^0 = \rho(r), \quad T_i^i = -P(r) \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} G_0^0 &= e^{-2\lambda} \left( \frac{1}{r^2} - \frac{2\lambda'}{r} \right) - \frac{1}{r^2} = -8\pi \rho(r) \\ G_1^1 &= e^{-2\lambda} \left( \frac{1}{r^2} + \frac{2\nu'}{r} \right) - \frac{1}{r^2} = 8\pi P(r) \\ G_2^2 &= e^{-2\lambda} \left( \nu'' + \nu'^2 - \lambda' \nu' + \frac{\nu' - \lambda'}{r} \right) = 8\pi P(r) \\ G_3^3 &= G_2^2 = 8\pi P(r) \end{aligned} \quad (2.7)$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{[P(r) + \rho(r)] [M(r) + 4\pi r^3 P(r)]}{r[r - 2M(r)]} \quad (2.8)$$

**Todo:** Interpretación del sistema en el Glendennig.

$$M(r) \equiv 4\pi \int_0^r \rho(r) r^2 dr \quad (2.9)$$

**Remark:** Se debe aclarar la diferencia entre la masa encerrada y la energía total.

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (2.10)$$



## 2.3 Estructura interna de objetos compactos y ecuaciones de estado

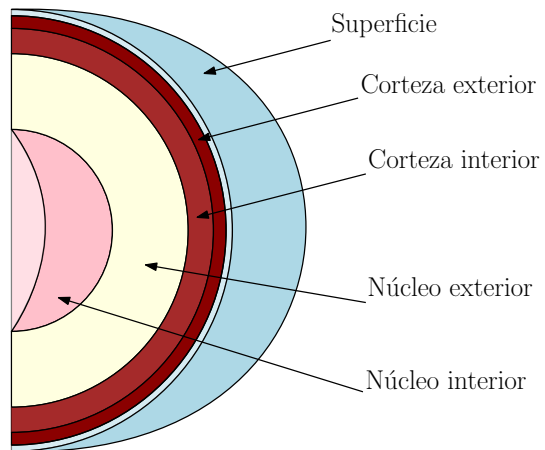


Figura 2.1: Estructura interna de una estrella de neutrones

**Todo:** Llenar la imagen.

## 2.4 Criterios de estabilidad

### 2.4.1 Condición de estabilidad de Harrison-Zeldovich-Novikov

$$\frac{\partial M(\rho_c)}{\partial \rho_c} > 0 \quad (2.11)$$

### 2.4.2 Condición de estabilidad por convección adiabática

$$\rho''(r) \leq 0 \quad (2.12)$$

## CAPÍTULO 3

# Planteamiento del problema

---

## CAPÍTULO 4

# Objetivos

---

CAPÍTULO 5

# Metodología

---

# Bibliografía

- [1] N. Glendenning, *Compact Stars*, 2nd ed. Springer-Verlag New York, 2000.
- [2] D. Scilla, “Introduction to stellar evolution,” *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 703, p. 012002, 2016. [Online]. Available: <http://stacks.iop.org/1742-6596/703/i=1/a=012002?key=crossref.f117e18516bbec478f0c53e64f1de69d>
- [3] S. Woosley and T. Janka, “The Physics of Core-Collapse Supernovae,” *Nature Physics*, vol. 1, pp. 147–154, 2005.
- [4] H. T. Janka, “Explosion Mechanisms of Core-Collapse Supernovae,” *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, pp. 1–35, 2012. [Online]. Available: <http://arxiv.org/abs/1206.2503%0A>

**Todo:** Chequear que los links generados por Mendeley funcionen