

En el corazón de las estrellas de neutrones: laboratorio cósmico donde la materia alcanza sus límites

At the Heart of Neutron Stars: A Cosmic Laboratory Where Matter
Reaches Its Limits

—

Carlos Alberto Camposeco Coutiño¹

carlos.campcou23@gmail.com

ORCID: 0009-0008-0990-0896

Salvador Zarco Juárez²

salvadorzarco22@gmail.com

ORCID: 0009-0006-4279-1172

Saúl Fernando Hernández Ortiz³

saul.ortiz@umich.mx

ORCID: 0000-0001-8672-4680

1 INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ESPECIALIDADES

2 FACULTAD DE MEDICINA, UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO.

TOLUCA DE LERDO, ESTADO DE MÉXICO, MÉXICO.

3 FILIACIÓN INSTITUCIONAL: FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA / UNIVERSIDAD

MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO. DEPARTAMENTO DE CIENCIAS

BÁSICAS / UNIVERSIDAD AERONÁUTICA EN QUERÉTARO. QUERÉTARO, MÉXICO.



Para citar este artículo:

Camposeco Coutiño, C. A., Zarco Juárez, S., & Hernández Ortiz, S. F. En el corazón de las estrellas de neutrones: laboratorio cósmico donde la materia alcanza sus límites. *Espacio I+D, Innovación más Desarrollo*, 15(45). <https://doi.org/10.31644/IMASD.45.2026.a06>

RESUMEN

Las estrellas de neutrones representan algunos de los laboratorios naturales más extremos del universo. Nacidas del colapso de estrellas masivas tras una explosión de supernova, concentran una masa comparable a la del Sol en una esfera de apenas unos kilómetros de radio. En su interior, la materia alcanza densidades tan altas que su comportamiento sigue siendo uno de los grandes enigmas de la física moderna. Comprender cómo se relacionan la presión, la densidad y la gravedad en estas condiciones requiere conocer la ecuación de estado de la materia densa. Hoy, gracias a las observaciones multimensajeras, que combinan ondas gravitacionales y señales electromagnéticas, comenzamos a obtener pistas sobre su estructura interna, abriendo la posibilidad de nuevos estados de la materia en el corazón de estas estrellas.

Palabras clave:

Estrellas de neutrones; ecuación de estado; astronomía multimensajera; ondas gravitacionales; materia superdensa; velocidad del sonido.

— *Abstract* —

Neutron stars represent some of the most extreme natural laboratories in the universe. Born from the collapse of massive stars after a supernova explosion, they concentrate a mass comparable to that of the Sun within a sphere only a few kilometers in radius. Inside them, matter reaches densities so high that its behavior remains one of the great enigmas of modern physics. Understanding how pressure, density, and gravity interact under these conditions requires determining the equation of state of dense matter. Today, thanks to multimessenger observations, combining gravitational waves and electromagnetic signals, we are beginning to obtain clues about their internal structure, opening the possibility of new states of matter in the hearts of these stars.

Keywords:

Neutron Stars; Equation of State (EOS); multi-messenger astronomy; Gravitational Waves (GW); High dense matter; speed of sound.

Cuando la noche cae y el cielo se despeja, observamos una multitud de pequeños puntos azulados suspendidos en la oscuridad. Los llamamos estrellas. Pero ¿qué historia se esconde detrás de esos puntos aparentemente inmóviles?

En este artículo exploramos cómo la evolución de las estrellas masivas puede conducir a la formación de estrellas de neutrones y por qué estos objetos constituyen laboratorios naturales para estudiar la materia bajo condiciones extremas. En particular, revisaremos de manera accesible cómo la ecuación de estado, el equilibrio gravitacional descrito por las ecuaciones de Tolman–Oppenheimer–Volkoff (TOV) y la velocidad del sonido permiten relacionar las propiedades microscópicas de la materia con observables como la masa, el radio y la deformabilidad de marea. Finalmente, mostraremos cómo las observaciones multimensajeras, especialmente las provenientes de fusiones de estrellas de neutrones, permiten confrontar estas ideas con la naturaleza y explorar la posible existencia de nuevos estados de la materia en su interior.

Para comenzar a entender a las estrellas, conviene mirar a la más cercana: el Sol. En numerosas culturas prehispánicas fue venerado como deidad, símbolo de vida y eternidad. Hoy sabemos que no es un objeto divino, sino una estrella más, gobernada por las mismas leyes físicas que rigen el universo (Kippenhahn, 1986). Nació hace aproximadamente 4.6 mil millones de años a partir del colapso gravitacional de una nube interestelar compuesta principalmente por hidrógeno (Kaiser, 2025). Aunque el Big Bang marcó el inicio de la expansión cósmica, las estrellas no aparecieron inmediatamente: fue necesario que la materia se enfriara, se agrupara y permitiera que la gravedad hiciera su trabajo (Kippenhahn, 1986).

Pero no todas las estrellas son como el Sol. El brillo que percibimos no es uniforme: el color de una estrella revela su temperatura superficial. Las más frías brillan en tonos rojizos; conforme aumenta la temperatura, el color transita por el amarillo y el blanco hasta llegar al azul, característico de las más calientes y masivas. Entonces surge la pregunta inevitable: ¿por qué brillan?

No se trata de explosiones constantes ni de combustión química. El brillo estelar es el resultado de la fusión nuclear: núcleos de hidrógeno se combinan para formar helio, liberando enormes cantidades de energía según la relación $E = mc^2$. Esta reacción equilibra la gravedad durante la mayor parte de la vida de la estrella, etapa conocida como secuencia principal (Kippenhahn, 1986), donde pasan cerca del 90% de su existencia.

El destino de una estrella está determinado casi por completo por su masa. Cuando el hidrógeno central se agota, la gravedad vuelve a imponerse: el núcleo se contrae y se calienta, mientras las capas externas se expanden formando una gigante roja. En estrellas mucho más masivas que el Sol —más de ocho masas solares— la historia continúa de manera dramática: se convierten en supergigantes. En su interior se desarrolla una estructura en capas, semejante a una cebolla. Cada capa fusiona un elemento distinto: hidrógeno, helio, carbono, oxígeno, silicio... hasta llegar al hierro.



Nota. "Vida de una estrella", adaptada de "Estrellas de neutrones", de P. Salas y M. A. Solís, 2006, Revista Mexicana de Física E, 52(1), p. 38.

Figura 1. Evolución estelar

Y aquí aparece un límite fundamental de la física nuclear. Mientras la fusión de elementos más ligeros que el hierro libera energía, fusionar hierro requiere absorberla. El núcleo pierde entonces su fuente de presión térmica estable y la gravedad ya no tiene oposición suficiente. El colapso es inevitable.

Durante esa implosión, los electrones son comprimidos hasta combinarse con los protones mediante interacción débil, formando neutrones. En fracciones de segundo, el núcleo se densifica de manera extrema y la envoltura externa es expulsada violentamente en una supernova. Esa explosión no es solo un final, es una forja cósmica: en las condiciones extremas del estallido se sintetizan elementos más pesados que el hierro, como el oro o el uranio. Los átomos que componen nuestro planeta y nuestro cuerpo son vestigios de antiguas supernovas.

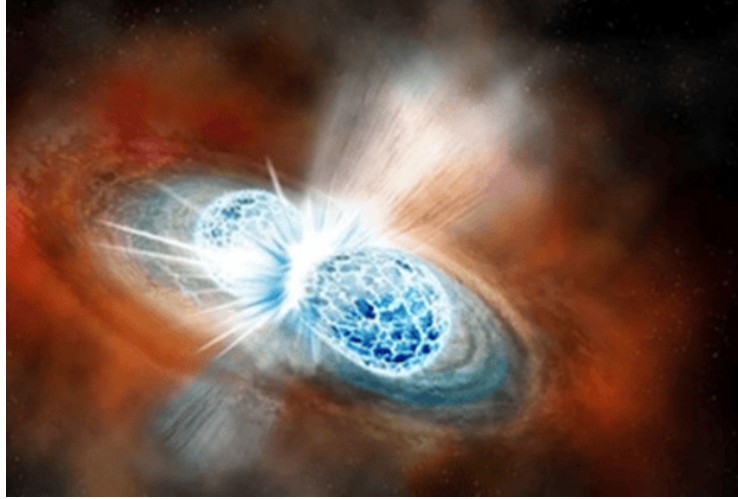
Este recorrido evolutivo, desde la secuencia principal hasta los remanentes compactos, se resume esquemáticamente en la Figura 1. Lo que queda tras la explosión depende nuevamente de la masa del núcleo remanente. Si es suficientemente grande, la gravedad lo comprimirá hasta formar un agujero negro. Si no lo es, el resultado será uno de los objetos más extraordinarios del universo: una estrella de neutrones.



Nota. Adaptado y traducido de "Stars: Tolman-Oppenheimer-Volkoff equations" (p. 5), por A. Wojnar, 2021, University of Tartu.

Figura 2. Capas de la estrella de neutrones

La existencia de estas estrellas fue teorizada mucho antes de ser observada. La primera evidencia directa llegó en 1967 con la detección de una señal de radio extraordinariamente regular, repetida cada 1.3 segundos, inicialmente denominada "LGM-1", que más tarde se identificaría como el púlsar PSR B1919+21. La sorpresa fue mayúscula: la regularidad del pulso sugería un objeto compacto en rotación extremadamente rápida. Desde entonces, la mayoría de las estrellas de neutrones se han descubierto como púlsares, aunque no todas emiten pulsos detectables desde la Tierra. Con el tiempo, nuevas técnicas ampliaron nuestra capacidad de observación. En 2017, los detectores LIGO y Virgo registraron la fusión de dos estrellas de neutrones en el evento GW170817, observando simultáneamente ondas gravitacionales y radiación electromagnética. Nació así la astronomía multimensajera, y con ella una nueva etapa para poner a prueba los modelos teóricos que describen la materia en condiciones extremas.



Nota. De “A Primer on Neutron Stars”, Ilustración por Matthew R. Francis, 2019, JSTOR Daily (<https://daily.jstor.org/a-primer-on-neutron-stars/>). Copyright 2019 de ITHAKA.

Figura 3. Representación artística de la fusión de dos estrellas de neutrones

Estos eventos producen ondas gravitacionales y emisiones electromagnéticas observables simultáneamente, marcando el inicio de la astronomía multimensajera.

Ese nuevo comienzo no solo amplió nuestras capacidades de observación; también permitió organizar la información en un marco conceptual más claro. La llamada “matriz multimensajera”, representada en la Figura 4, sintetiza cómo la masa de chirp —el parámetro que se determina con mayor precisión a partir de la señal de ondas gravitacionales— se conecta con las firmas electromagnéticas producidas tras la fusión. Esta masa de chirp, una combinación matemática de las masas individuales del sistema binario, gobierna la evolución de la frecuencia de la señal justo antes del choque y permite estimar la masa total del sistema.

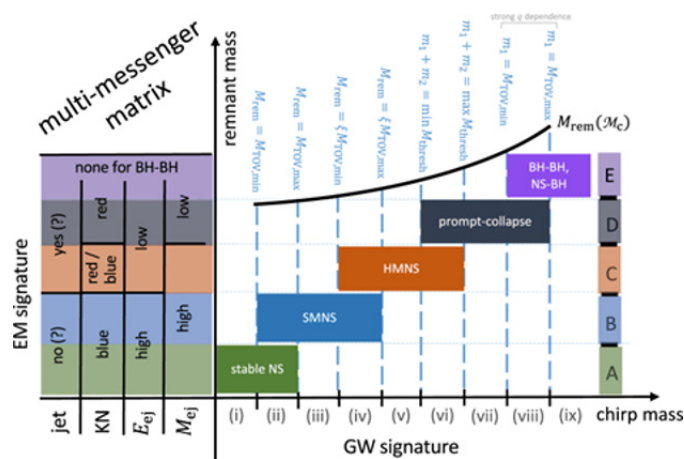


Figura 4. La Matriz Multimensajera

Esquema multimensajero de fusiones binarias de estrellas de neutrones. La masa de chirp (eje horizontal), obtenida a partir de la señal de ondas gravitacionales, determina la masa total del sistema y su comparación con los umbrales críticos de estabilidad. Según estos límites, el remanente puede ser una estrella estable, supramasiva (SMNS), hipermasiva (HMNS) o colapsar de manera inmediata a un agujero negro. Las regiones superiores indican las posibles firmas electromagnéticas asociadas (jet, kilonova azul/roja y masa eyectada), cuya combinación permite restringir la física de la materia a densidades supranucleares. Nota. Tomado de "Figure 2. 'Multi-Messenger Matrix' relating the range of expected EM counterparts of BNS mergers to the GW-measured chirp mass", por B. Margalit y B. D. Metzger, 2019, *The Multi-messenger Matrix: The Future of Neutron Star Merger Constraints on the Nuclear Equation of State*, p. 3.

Al comparar esa masa total con los umbrales críticos de estabilidad que impone la ecuación de estado, es posible anticipar el destino del remanente. Si la masa final es inferior al límite máximo permitido para una estrella no rotante (M_{TOV}), el resultado será una estrella de neutrones estable, pero si supera ligeramente el límite máximo, puede formar un remanente supermasivo (SMNS), sostenido temporalmente por su rotación uniforme, ahora bien, tomando en cuenta masas aún mayores, aparece un remanente hipermasivo (HMNS), cuya estabilidad depende de una rotación diferencial extrema y cuya vida es necesariamente breve. Finalmente, si la masa excede un valor crítico adicional (M_{thresh}), el sistema experimenta un colapso inmediato hacia un agujero negro en el instante mismo de la colisión.

La transición entre estos regímenes no es arbitraria: depende de la rigidez de la materia, es decir, de cuán eficientemente la presión responde al aumento de la densidad. Y es aquí donde las señales electromagnéticas adquieren un papel decisivo. La presencia o ausencia de un jet relativista, el color de la kilonova —azul o roja según la composición del material eyectado— y la cantidad de masa expulsada al medio interestelar funcionan como indicadores del proceso interno. Al combinar estas observaciones con la masa de chirp inferida de las ondas gravitacionales, es posible imponer límites cada vez más precisos sobre el radio estelar y sobre la densidad máxima alcanzada en el interior, restringiendo así los modelos de materia nuclear en condiciones extremas.

Una estrella de neutrones puede concentrar una masa comparable a la del Sol en una esfera de apenas 20 a 25 kilómetros. Su densidad alcanza valores del orden de 10^{14} – 10^{15} g/cm³, comparable a la densidad nuclear. Su estructura no es uniforme: una corteza externa sólida compuesta por núcleos pesados y electrones; una región interna donde los núcleos comienzan a disolverse en neutrones libres; y un núcleo profundo cuya composición aún es incierta. ¿Existen allí condensados de mesones? ¿Hiperones? ¿Un plasma de quarks desconfiados? ¿O quizá un estado intermedio todavía no completamente comprendido?

En este punto emerge un concepto central: la ecuación de estado, que establece la relación entre la presión y las propiedades termodinámicas de la materia en este

régimen extremo. Para describirla, resulta útil introducir la densidad de energía, (ϵ), que representa la cantidad de energía contenida por unidad de volumen, y la densidad numérica de partículas, (n). Como referencia, suele emplearse la densidad de saturación nuclear, (n_0), correspondiente aproximadamente a la densidad a la que se encuentran los protones y neutrones dentro de los núcleos atómicos. La ecuación de estado permite entonces determinar cómo responde la presión de la materia al aumentar estas densidades y constituye uno de los elementos fundamentales para comprender la estructura de una estrella de neutrones. Esta relación también determina la familia completa de soluciones de las ecuaciones de TOV, que describen el equilibrio hidrostático relativista entre la presión y la gravedad. En términos sencillos, las ecuaciones TOV permiten determinar cómo varían la presión, la densidad de energía y la masa desde el centro hasta la superficie de una estrella de neutrones, y establecer así qué configuraciones pueden permanecer estables frente a su propia gravedad. En condiciones ordinarias, dicha relación es relativamente sencilla. Pero dentro de una estrella de neutrones intervienen efectos cuánticos, relativistas y las interacciones fuertes entre los constituyentes de la materia nuclear. Si la ecuación de estado es blanda, la presión crece lentamente con la densidad y la estrella será más compacta, con una masa máxima estable menor. Si es rígida, la presión aumenta con mayor rapidez y puede sostener objetos más masivos frente al colapso gravitacional.

Esta diferencia no es meramente descriptiva, refleja qué tan eficientemente la materia resiste la compresión. En términos más fundamentales, esa resistencia está relacionada con la rapidez con la que la presión responde a cambios en la densidad de energía, una propiedad que puede caracterizarse mediante la velocidad del sonido en el medio, (c_s). En términos termodinámicos, su cuadrado está relacionado con la respuesta de la presión ante variaciones en la densidad de energía, $c_s^2 = \frac{\partial P}{\partial \epsilon}$.

Por ello, una ecuación de estado más rígida presenta, en general, una respuesta más pronunciada de la presión y un valor mayor de (c_s^2), mientras que una ecuación de estado más blanda presenta una respuesta más débil. Distintos comportamientos posibles de esta cantidad —incluyendo incrementos abruptos o máximos pronunciados en función de la densidad— se ilustran esquemáticamente en la Figura 5. Si la velocidad del sonido cambia abruptamente en un determinado rango de densidades, esto podría indicar algo más profundo que una simple variación cuantitativa: un cambio en los grados de libertad de la materia y, bajo determinadas condiciones, una posible transición de fase en el interior estelar, comparable, de manera muy simplificada, con el cambio de estado del agua de líquido a sólido, pero bajo condiciones de densidad y presión infinitamente más extremas.

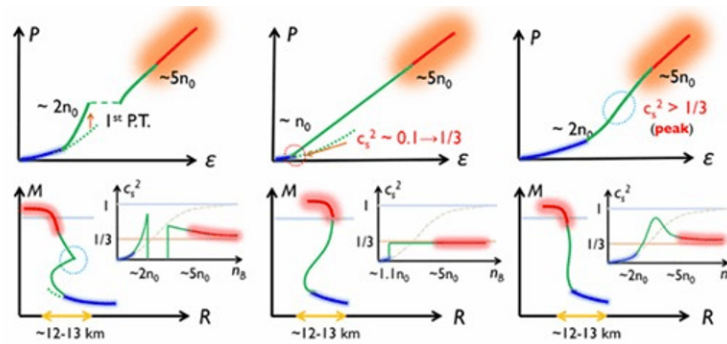


Figura 5. Ecuación de estado y velocidad del sonido

Representación esquemática de distintos comportamientos posibles de la ecuación de estado y de la velocidad del sonido al cuadrado c_s^2 en función de la densidad. En la parte superior se muestran diferentes relaciones presión–densidad, incluyendo el caso de una transición de fase y escenarios donde la rigidez de la materia aumenta de manera pronunciada. En la parte inferior se ilustran las consecuencias de estos comportamientos en la relación masa–radio de la estrella y en el perfil interno de la velocidad del sonido. Variaciones abruptas o picos en c_s^2 podrían estar asociadas a cambios en los grados de libertad de la materia, como la posible aparición de un régimen quarkiónico en el núcleo estelar. Nota. Tomado de "Fig. 2. Schematic of the squared speed of sound c_s^2 vs. energy density and corresponding M-R relation", por T. Kojo, 2021, QCD equations of state and speed of sound in neutron stars, p. 2.

En ese régimen, la materia podría reorganizar sus grados de libertad. Los neutrones y protones dejarían de ser las únicas entidades relevantes, y los quarks —sus constituyentes fundamentales— podrían adquirir un papel dinámico en la estructura del núcleo. La verdadera incógnita no es solo cuánta masa puede soportar una estrella de neutrones, sino qué tipo de materia permite sostenerla. ¿Está compuesta exclusivamente por neutrones altamente comprimidos? ¿Existen estados exóticos? ¿O la materia atraviesa una transición hacia un régimen quarkiónico intermedio entre la física nuclear efectiva y la cromodinámica cuántica fundamental?

Responder estas preguntas exige algo más que observación astronómica: requiere construir modelos capaces de describir la materia en ese régimen intermedio donde lo hadrónico y lo quarkiónico se entrelazan. Las observaciones recientes de púlsares masivos y de fusiones binarias han comenzado a imponer restricciones cada vez más precisas sobre la ecuación de estado. La Figura 6 ilustra esta tensión entre teoría y observación: distintas ecuaciones de estado propuestas en la literatura predicen relaciones masa–radio que no siempre logran reproducir simultáneamente los radios inferidos y la existencia de púlsares cercanos a dos masas solares. Esta discrepancia sugiere que nuestra descripción microscópica de la materia densa podría estar incompleta. Otra propiedad que permite poner a prueba estas descripciones es la deformabilidad de marea, que mide qué tan fácilmente una estrella de neutrones puede deformarse bajo el intenso campo gravitatorio

de su compañera durante una fusión. Esta deformación depende de la estructura interna de la estrella y, por tanto, de cómo responde la materia a la compresión y de la rigidez efectiva de la ecuación de estado. Su medición a partir de las ondas gravitacionales proporciona así información adicional sobre las propiedades de la materia en el interior estelar.

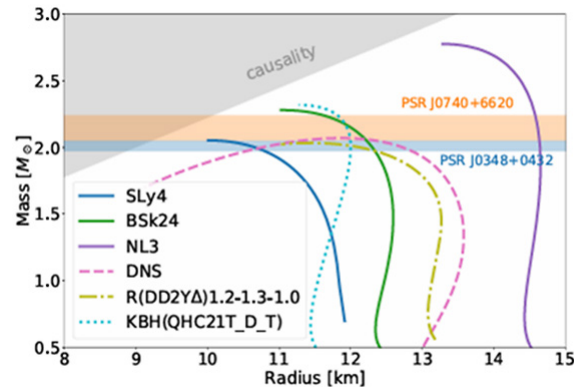


Figura 6. Comparativa de las Tolman-Oppenheimer-Volkoff (TOV) actuales y mediciones observacionales

Relación masa–radio predicha por diferentes ecuaciones de estado teóricas (curvas) comparada con restricciones observacionales provenientes de púlsares masivos como PSR J0348+0432 y PSR J0740+6620. La región sombreada superior indica el límite impuesto por causalidad. Algunas ecuaciones de estado no logran describir simultáneamente radios compatibles con las observaciones y masas cercanas o superiores a dos masas solares. Esta tensión motiva la exploración de modelos más completos para la materia a densidades extremas, incluyendo la posible aparición de nuevos estados, como un régimen quarkiónico en el núcleo estelar. Nota. Tomado de "Figure 3. Mass-radius relations for a representative sample of equations of state and current constraints from multi-messenger observations", por S. Ascenzi, V. Graber y N. Rea, 2024, *Neutron-star Measurements in the Multi-messenger Era*, p. 8.

Las estrellas de neutrones ofrecen una oportunidad única para conectar fenómenos astrofísicos observables con las propiedades microscópicas de la materia en condiciones extremas. En este artículo hemos presentado una revisión de los principales elementos que permiten establecer esta conexión, desde la evolución estelar y la formación de estos objetos compactos hasta la ecuación de estado, las ecuaciones de Tolman–Oppenheimer–Volkoff (TOV), la velocidad del sonido y la deformabilidad de marea. A través de estos conceptos hemos mostrado cómo las propiedades macroscópicas de las estrellas de neutrones pueden utilizarse para explorar las características de la materia en su interior y para confrontar diferentes modelos teóricos con las observaciones disponibles. En particular, la posible aparición de nuevos grados de libertad o transiciones

de fase en las regiones más densas constituye uno de los problemas abiertos más interesantes de la física de la materia densa.

Las futuras observaciones multimensajeras serán fundamentales para avanzar en esta dirección. La detección conjunta de ondas gravitacionales y señales electromagnéticas provenientes de nuevas fusiones de estrellas de neutrones permitirá obtener información complementaria sobre sus masas, deformabilidad de marea, dinámica de la colisión y propiedades del material expulsado. La acumulación de estos eventos y su comparación sistemática con modelos teóricos podría imponer restricciones cada vez más precisas sobre la ecuación de estado y proporcionar nuevas pistas sobre posibles transiciones de fase y nuevos estados de la materia en el núcleo estelar. De esta manera, la astronomía multimensajera permitirá no solo conocer mejor las estrellas de neutrones como objetos astrofísicos, sino también establecer restricciones cada vez más precisas sobre las propiedades de la materia en condiciones que no pueden reproducirse en la Tierra.

Así, el universo se convierte en un laboratorio natural. Las estrellas de neutrones no solo representan el desenlace evolutivo de ciertas estrellas masivas; constituyen escenarios donde la materia es llevada al límite de lo conocido. Comprender su estructura interna implica explorar el comportamiento de la interacción fuerte bajo condiciones imposibles de reproducir en la Tierra. Las observaciones actuales sugieren que, en el corazón de una estrella de neutrones, la naturaleza podría estar revelando una fase aún no completamente comprendida. Y al estudiar cómo la presión, la densidad y la velocidad del sonido se entrelazan bajo la acción extrema de la gravedad, no solo buscamos describir un objeto astrofísico: intentamos descifrar cómo la materia reorganiza sus constituyentes más elementales cuando se enfrenta a sus propios límites.

REFERENCIAS

- Andronopoulos, E., & Gourgoulatos, K. N. (2026). Equation of state of highly asymmetric neutron-star matter from liquid drop model and meson polytropes. *European Physical Journal A*.
- Ascenzi, S., Graber, V., & Rea, N. (2024). Neutron-star measurements in the multi-messenger era. *Astroparticle Physics*, 158, Article 102935. <https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2024.102935>
- Baade, W., & Zwicky, F. (1934). On supernovae. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 20(5), 254–259. <https://doi.org/10.1073/pnas.20.5.254>
- Bell Burnell, J. (1977). Pulsars and their discovery. *Reviews of Modern Physics*, 49(4), 959–966. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.49.959>
- Damour, T. (2014). 1974: The discovery of the first binary pulsar. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1411.3930>
- Hewish, A., Bell, S. J., Pilkington, J. D. H., Scott, P. F., & Collins, R. A. (1968). Observation of a rapidly pulsating radio source. *Nature*, 217, 709–713. <https://doi.org/10.1038/217709a0>
- Kaiser, C. (2025, febrero 19). Datos sobre el Sol. *NASA Ciencia*. <https://ciencia.nasa.gov/datos-sobre-el-sol/>
- Kippenhahn, R. (1986). *Cien mil millones de soles: Estructura y evolución de las estrellas*. Editorial Labor.
- Kojo, T. (2021). QCD equations of state and speed of sound in neutron stars. *AAPPS Bulletin*, 31, Article 11. <https://doi.org/10.1007/s43673-021-00011-6>
- MacDonald, J. (2017, octubre 19). A primer on neutron stars. *JSTOR Daily*. <https://daily.jstor.org/a-primer-on-neutron-stars/>
- Margalit, B., & Metzger, B. D. (2019). The multi-messenger matrix: The future of neutron star merger constraints on the nuclear equation of state. *The Astrophysical Journal Letters*, 880(1), Article L15. <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab2ae2>
- Piekarewicz, J. (2018, abril 14). *Neutron skins and neutron stars in the multi-messenger era*. American Physical Society.
- Radice, D., Perego, A., Bernuzzi, S., & Zhang, B. (2020). The future of neutron star merger constraints on the nuclear equation of state. *Annual Review of Nuclear and Particle Science*, 70, 95–119. <https://doi.org/10.1146/annurev-nucl-013120-114541>
- Revista Digital Universitaria. (2018, junio 18). El choque de estrellas de neutrones y la alquimia del Universo. *Revista Digital Universitaria*. <https://www.revista.unam.mx/2018v19n3/el-choque-de-estrellas-de-neutrones/>
- Salas, P., & Solís, M. A. (2006). Estrellas de neutrones. *Revista Mexicana de Física E*, 52(1), 37–46.
- Wojnar, A. (2021). Stars: Tolman-Oppenheimer-Volkoff equations. *Revista Mexicana de Física*, 67(5), 1–10. <https://doi.org/10.31349/RevMexFis.67.050701>