



La Asociación Salvadoreña de Astronomía le invita a la charla:



## **AGUJEROS NEGROS, GRAVEDAD EXTREMA Y ONDAS GRAVITACIONALES.**

Por: Ing. Francisco Raúl Arturo López Velado.  
Miembro de ASTRO y de la Sociedad Planetaria.

Fecha y hora: 10 de junio de 2019, 6:30 p.m.

Lugar: La Casa Tomada

Calle La Reforma #179, Colonia San Benito.

Frente a la Embajada de España



# Introducción

---

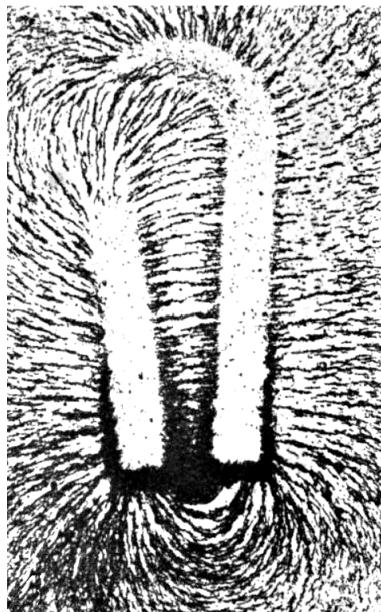
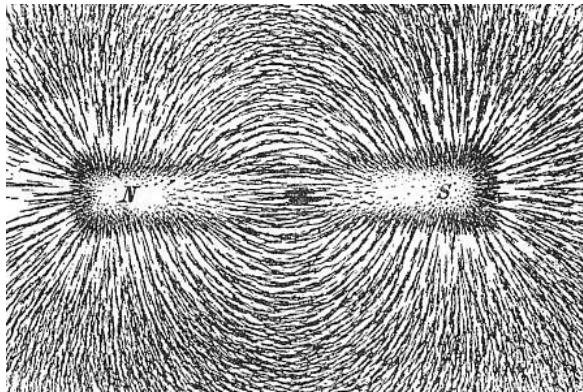
- ¿Tema nuevo o antiguo?
- ¿Adónde estaba usted, cuándo escuchó el tema por primera vez?
- Para mi la primera vez que escuché sobre el tema, fue cuando vi una película de Disney.
- <https://www.youtube.com/watch?v=ZCw67CtIOYM>



# Introducción

---

- Antes de hablar de los agujeros negros, debemos hablar de varios temas.
  - Campos magnéticos, eléctricos y gravitacionales
  - Las leyes físicas que rigen el universo
  - La formación de las estrellas y su muerte



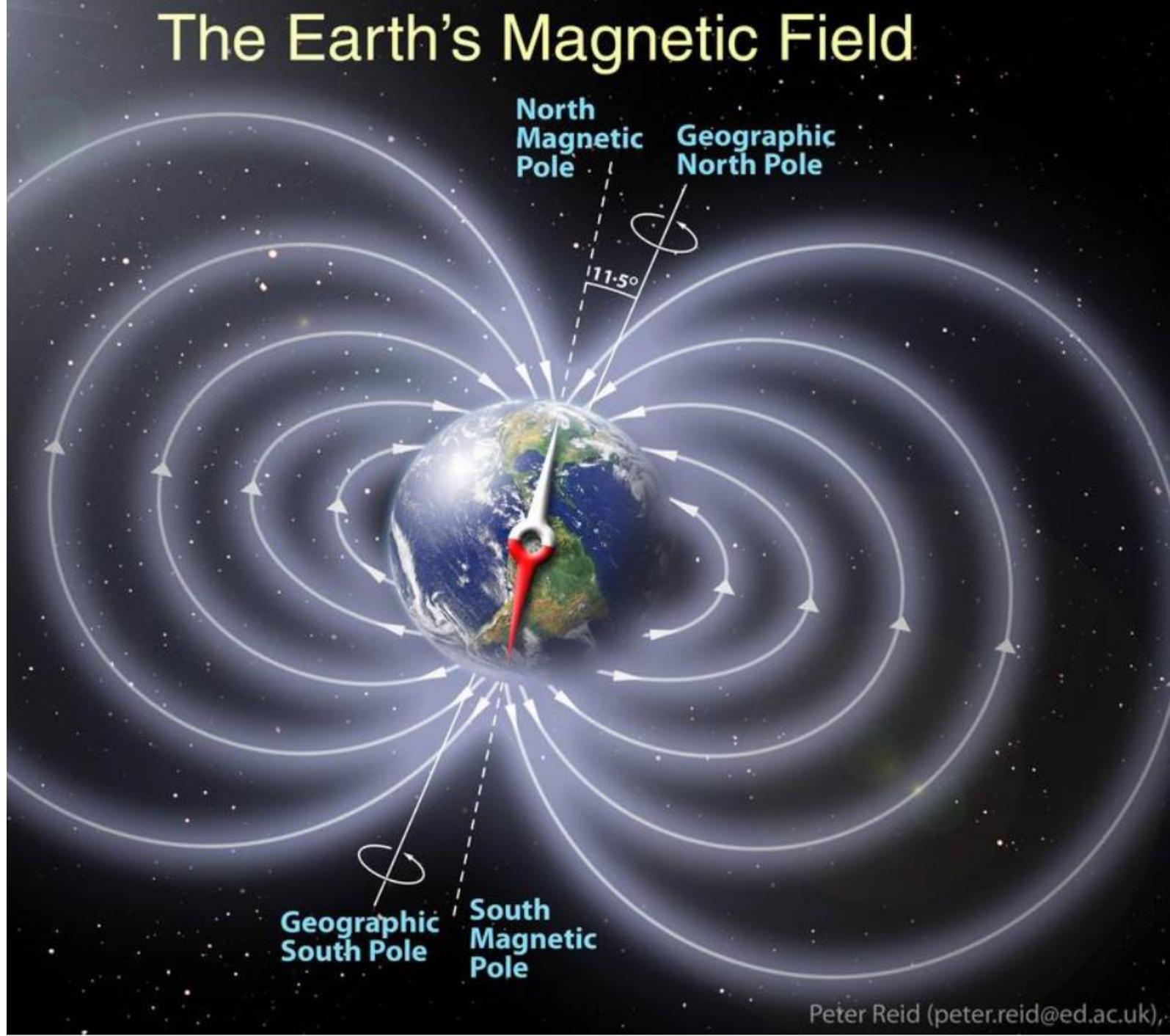
# Campos Magnéticos

---

- Líneas de campo magnéticas.
- Siendo un niño bastante curioso, tuve la oportunidad de realizar varias veces este curioso experimento. Lo invito a realizarlo, sólo requerirá un imán. Entre más fuerte sea éste, mejor y las limaduras de hierro puede obtenerlas de arena de construcción.
- Puede observarse como las limaduras se orientan siguiendo las líneas de fuerza del campo, saliendo de uno de los campos hasta llegar hasta el otro.
- Si acercamos dos polos de signo diferente, la fuerza es de tipo atractivo, claramente. Por otro lado, otro experimento interesante es tratar de acercar los dos polos norte o dos polos sur de dos diferentes imanes. La fuerza en ese caso, es de tipo repulsivo.
- Ahora bien, resulta que la tierra también tiene un campo magnético, con dos polos.

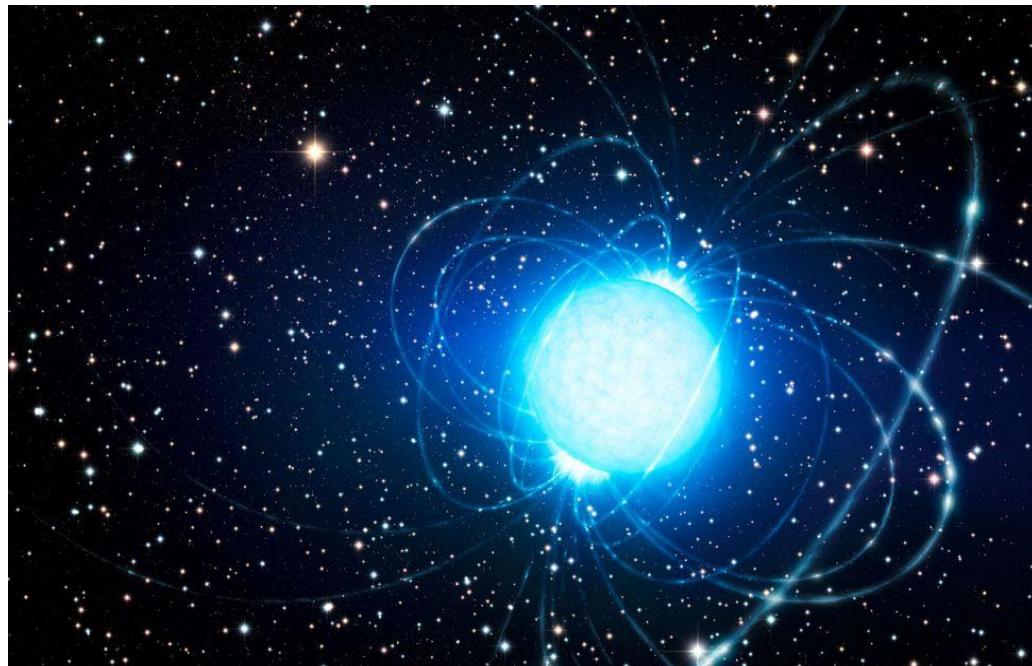
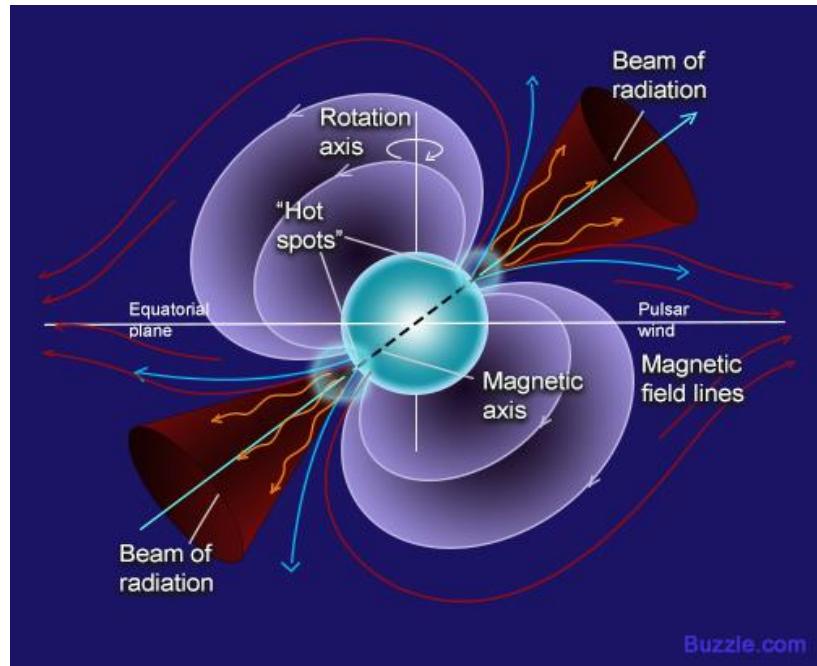
# Campos magnéticos

- La Tierra también tiene un campo magnético.
- De hecho, la naturaleza nos da un hermoso recordatorio de este campo, a través de las auroras boreales, las cuales no son más que los protones que salen del sol y que son capturados por el campo magnético del planeta, atravesando la atmósfera, donde colisionan con las moléculas de oxígeno y nitrógeno, haciéndolas iluminarse, al volverlas fluorescentes.





# Ejemplos de campos magnéticos de estrellas



Al igual que nuestro planeta, las estrellas también tienen campos magnéticos.

En particular es necesario resaltar los campos magnéticos de cierto tipo particular de estrellas, las estrellas de neutrones, los cuales son mucho más poderosos. Las partículas capturadas en ellos, pueden iluminar las líneas de fuerza como se muestra en la siguiente figura, produciendo los rayos que se mostrados, los cuales consisten en todo tipo de radiación, desde ondas de radio, rayos infrarrojos, luz visible, ultravioleta, rayos X y rayos Gamma.

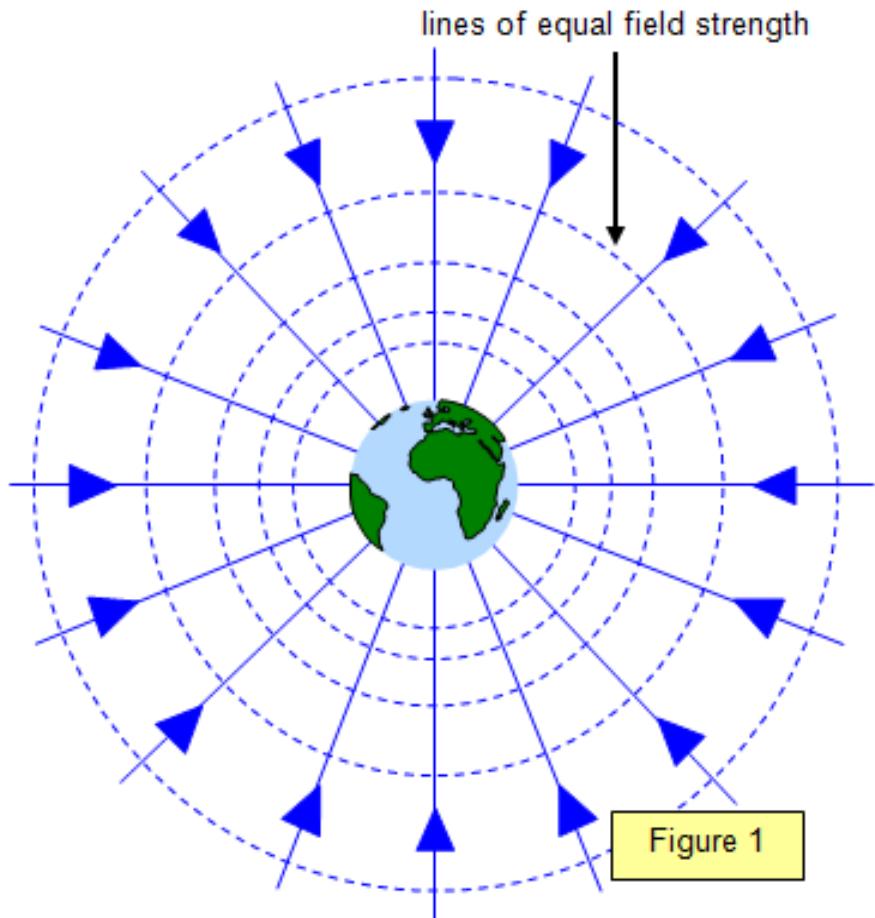
A medida que la estrella gira sobre su propio eje, sus rayos luminosos barren el cielo alrededor de la estrella, como la luz de un faro.

Cada vez que los rayos barren la Tierra, se observa un pulso de radiación, por lo que se a estos objetos se les denomina "pulsares". El segundo caso se conoce como un magnetar o magnetoestrella.

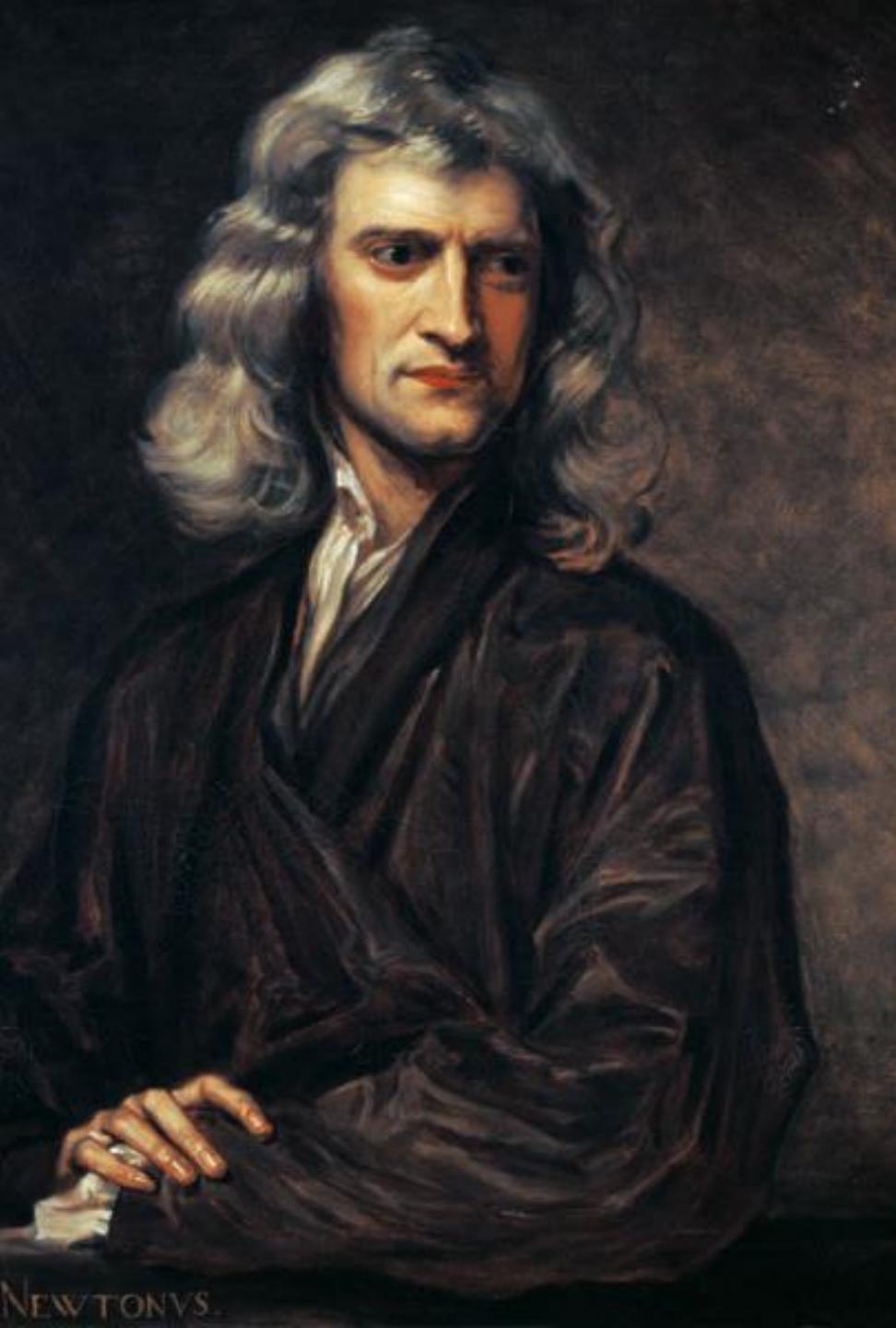
# Campos eléctricos

- Otro tipo de campos que observamos en la tierra, son los campos eléctricos. Relacionados por supuesto con los campos magnéticos.
- Son los causantes del flujo de electrones que llamamos energía eléctrica.

# Campo gravitacional



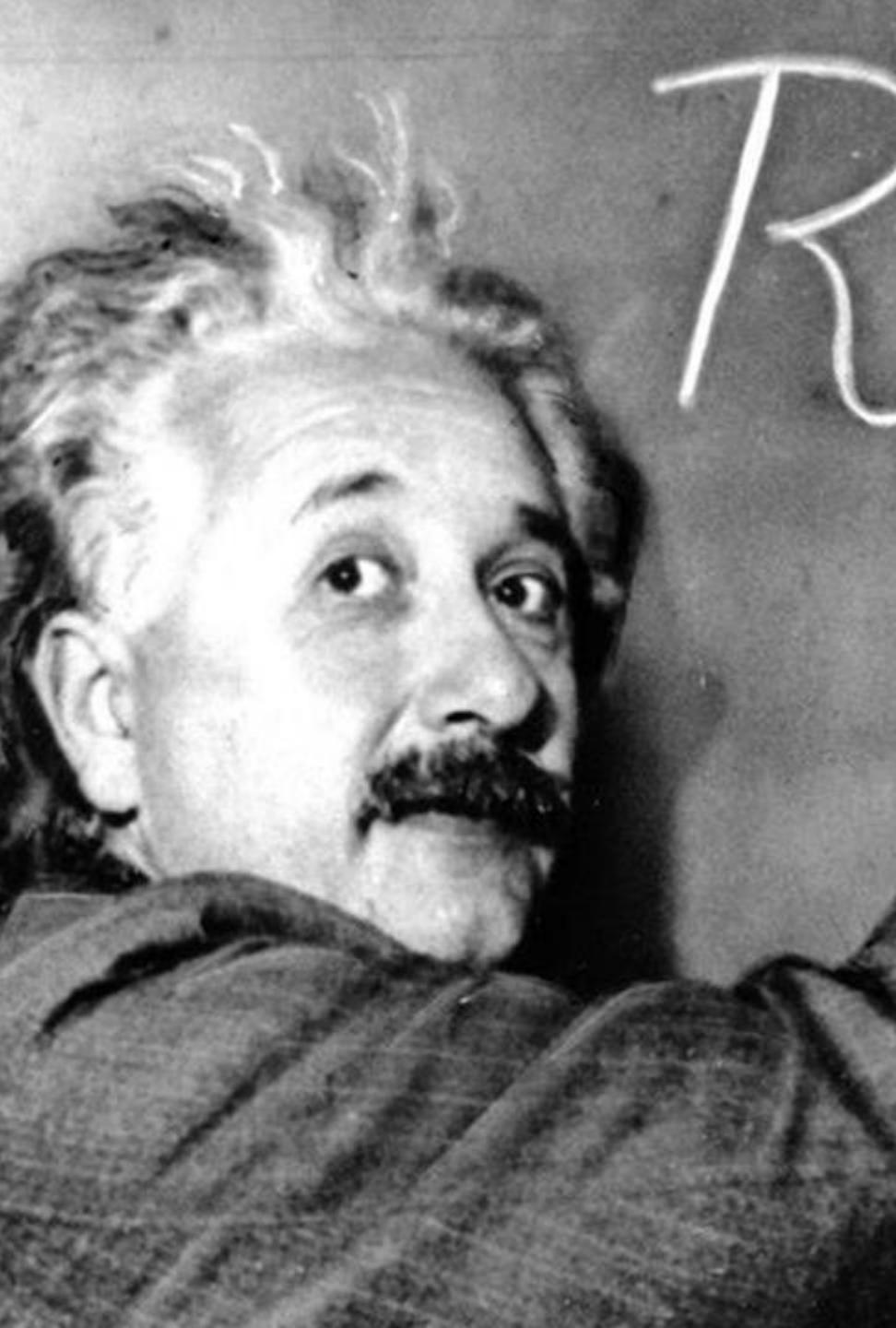
- Otro ejemplo, son los campos gravitacionales (los cuales podemos interpretar como fuerzas de línea gravitacional, que por ejemplo nos jalan hacia el centro de la Tierra).
- Las líneas de fuerza gravitacional apuntan de forma radial hacia la tierra y jalan a los objetos hacia la tierra con ellos. La intensidad del jalón gravitacional es proporcional a la densidad de las fuerzas de línea (el número de líneas que pasan por un área fija).
- Cómo puede verse en la imagen, la densidad de las líneas se intensifica a medida que nos acercamos al centro de la Tierra. Resulta que la intensidad se incrementa a medida que se acerca al centro de la Tierra en un factor de  $1/\text{área de la esfera azul}$ . Dado que el área de la esfera es proporcional al cuadrado de la distancia desde el centro de la Tierra ( $pr^2$ ), la intensidad del campo gravitatorio también se incrementa en la medida que se disminuye la distancia al centro de la Tierra.



# Las leyes que gobiernan el universo

---

- Nuestro conocimiento del universo ha ido evolucionando a través del tiempo..
- Las leyes newtonianas.
- Ya para el siglo XVII (1690), las leyes newtonianas de la Física nos daban una idea bastante exacta de la forma en que movían los astros. Entendíamos gracias a ellas, cómo se movía la Luna alrededor de la Tierra y la Tierra alrededor del Sol. Los conceptos como fuerza, masa y aceleración, unidos a través de ecuaciones como  $F = ma$ , permitieron un entendimiento más profundo del funcionamiento del universo.
- Sin embargo, al principio del siglo XX (1915), la evidencia de que las leyes newtonianas fallaban en el ámbito de lo muy rápido (objetos que se mueven cerca de la velocidad de la luz), el de lo muy grande (nuestro universo como un todo) y el reino de la gravedad intensa (como por ejemplo, los agujeros negros), se iba acumulando.



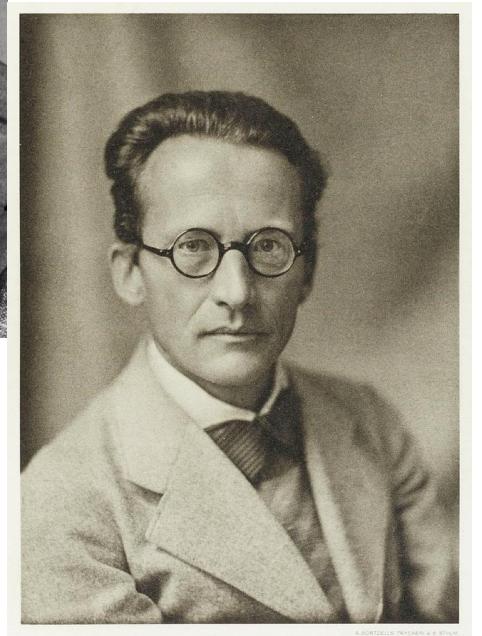
# Las leyes que gobiernan el universo

---

- Las leyes relativistas.
- Afortunadamente, la genialidad de Einstein nos dió las **leyes relativistas de la física** para compensar esta situación. Usando los conceptos de del tiempo curvo y el espacio curvo, las leyes relativistas predicen y explican la expansión del universo, los estrellas de neutrones, los agujeros negros y los agujeros de gusanos.

# Las leyes que gobiernan el universo

- Para 1924, se evidenció que las leyes Newtonianas fallaban también en el ámbito de lo muy pequeño (moléculas, átomos y las partículas fundamentales). Neils Bohr, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger y otros nos dieron las **leyes cuánticas de la física**. Utilizando el concepto de que todo fluctúa al azar al menos un poco y estas fluctuaciones, a su vez, pueden producir nuevas partículas y radiación donde antes no existía y gracias a ellas, tenemos la energía nuclear, los rayos lásers, la televisión, los LEDs y un entendimiento más profundo de la química.

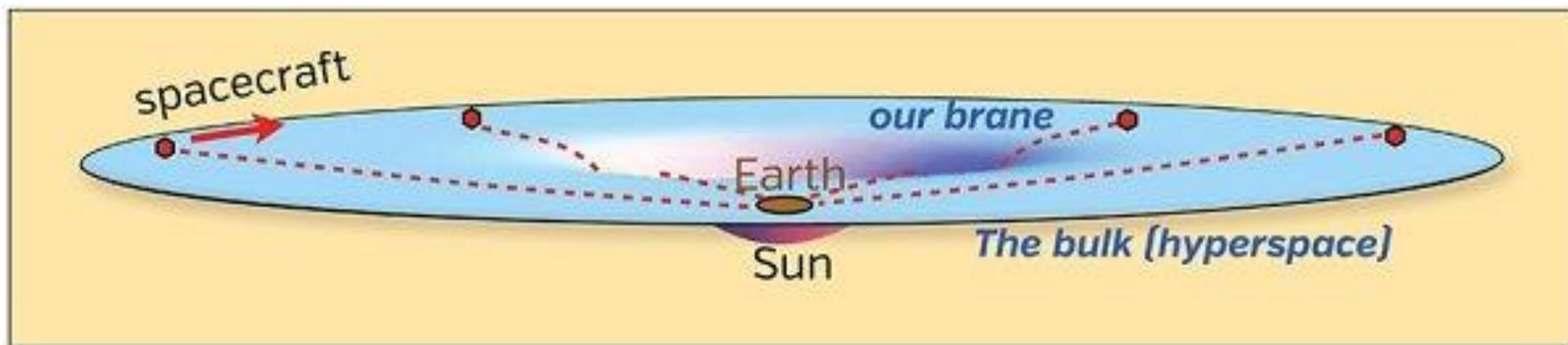


# Las leyes que gobiernan el universo

- Sin embargo hay un problema...
- Alrededor de 1957 se hizo evidente que las leyes relativistas y las leyes cuánticas son fundamentalmente incompatibles, pues predicen cosas diferentes e incompatibles en los ámbitos donde la gravedad es intensa y las fluctuaciones cuánticas son fuertes. Estos escenarios incluirían: el momento del nacimiento del universo (Big Bang), el corazón de los agujeros negros y ... los viajes en el tiempo hacia el pasado.
- Todavía a esta fecha, los científicos están buscando las leyes que permitan el **matrimonio ardiente** de las leyes físicas con las leyes cuánticas. A esta unión se le denomina **leyes cuánticas de la gravedad**. Todavía a esta fecha no conocemos completamente estas leyes. Apenas comenzamos a entender a las mismas. Uno de los primeros avances que hemos tenido sobre estas leyes es la **Teoría de las Súpercuerdas**. Sin embargo, hay mucha tierra inexplorada que requerirá todavía mucha investigación antes de que declaremos conquistada esta tierra.

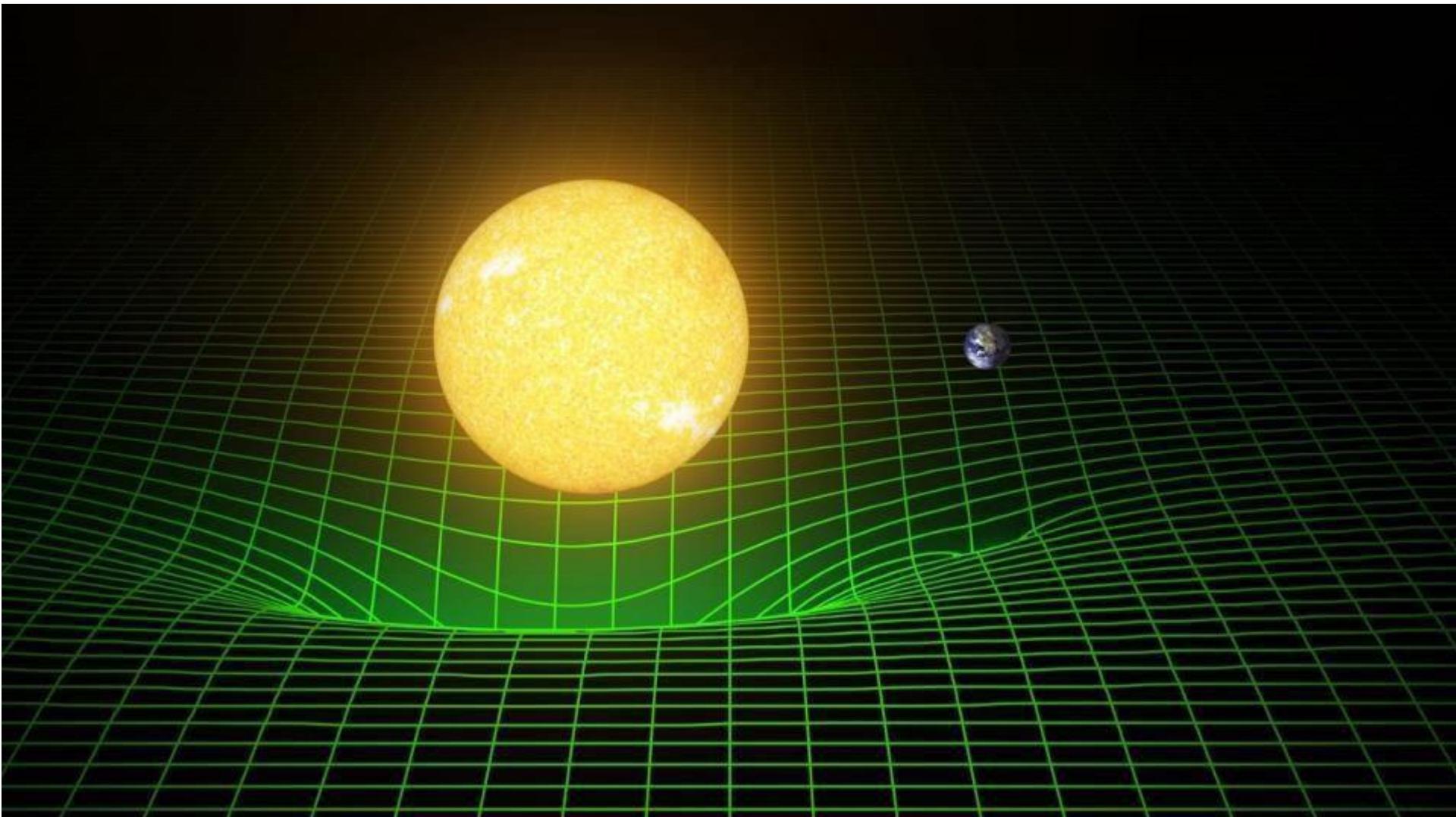


# El hiperespacio



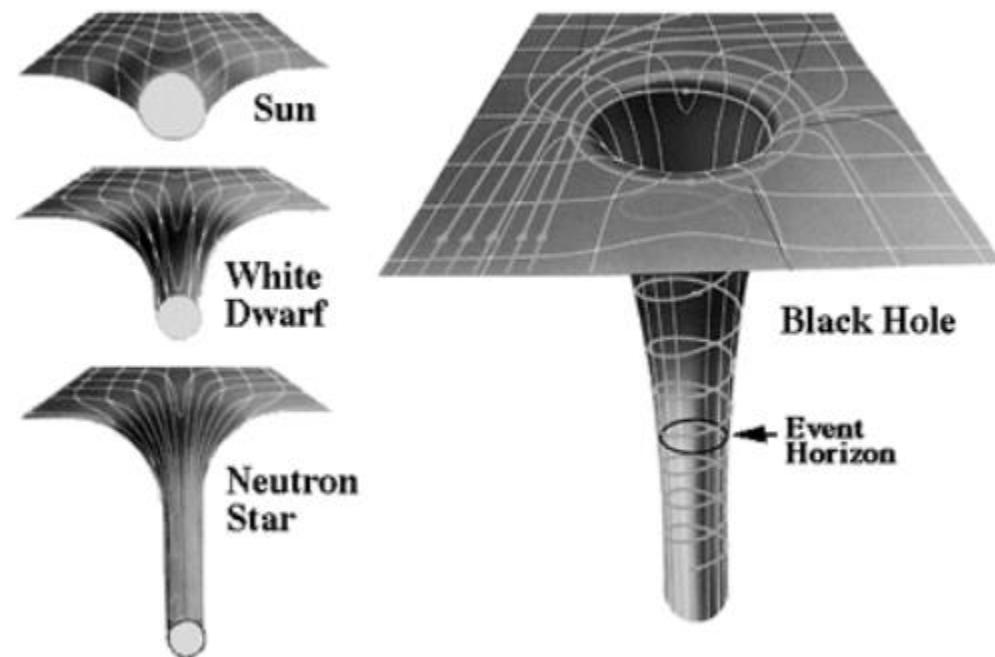
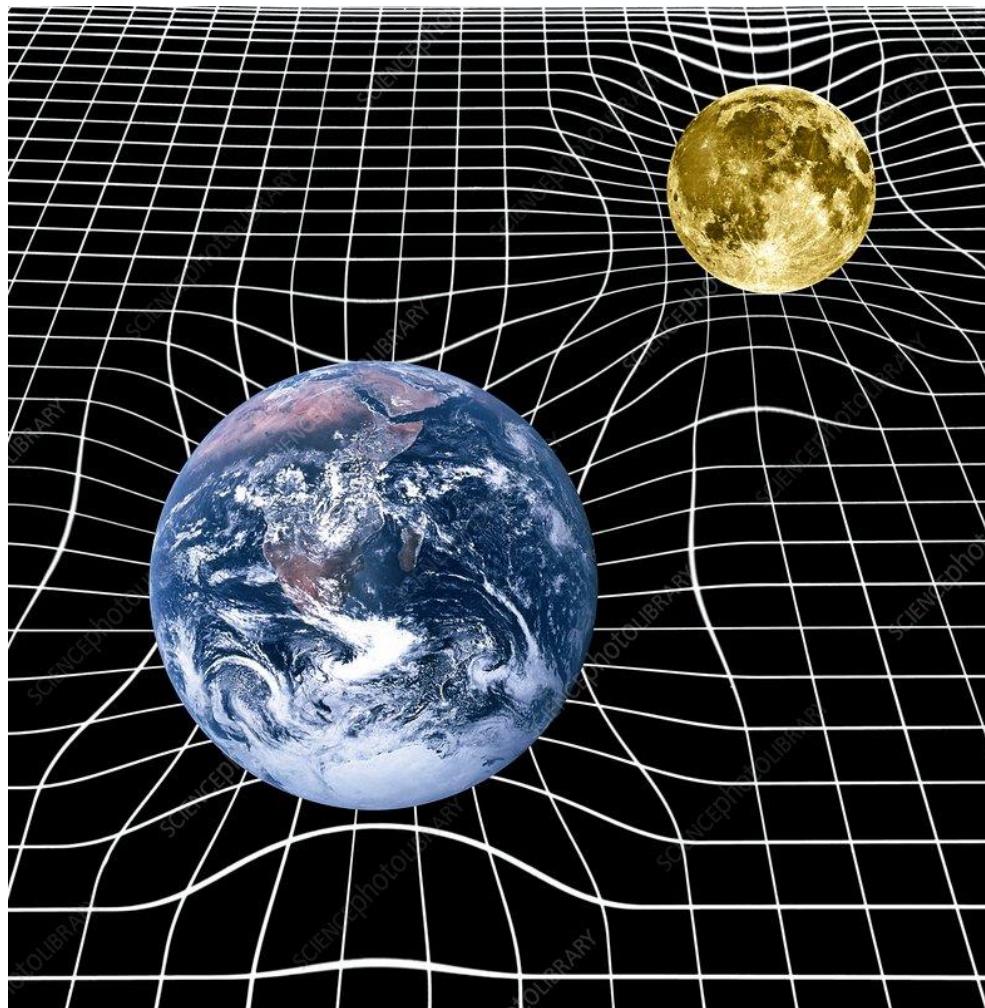
Una consecuencia de la búsqueda de las leyes cuánticas de la gravedad, es la perspectiva, todavía no comprobada de que nuestro universo podría ser uno de infinitos universos. Una membrana (O “brana”, en un conjunto de membranas, el cual los científicos acostumbran llamar “el bulto”, “mole”o “bulk” por su nombre en inglés.

# Espacio-tiempo curvo



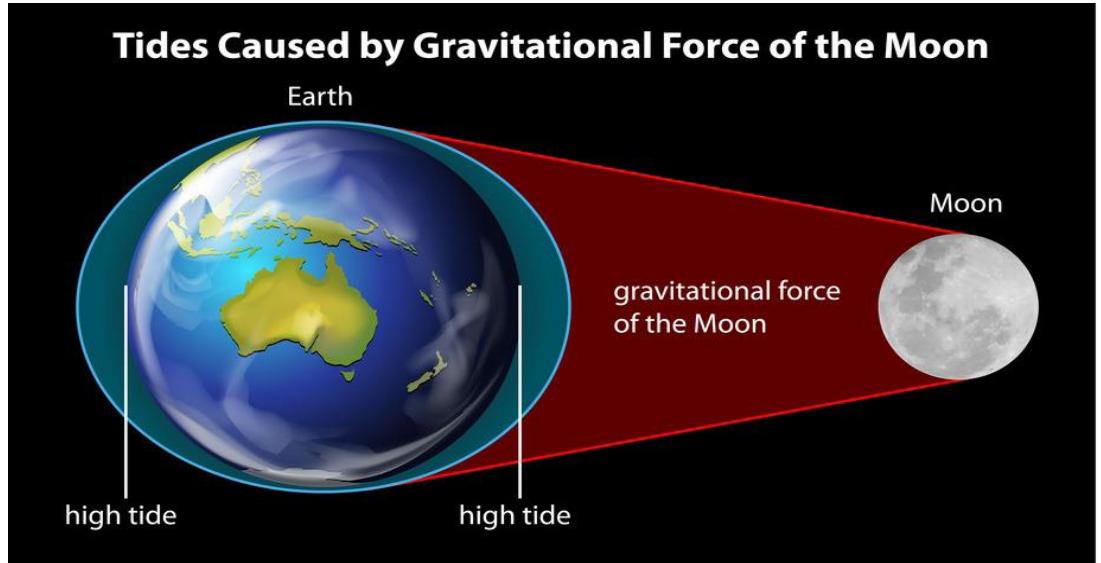
- Una de las conclusiones más sorprendentes de las teorías de Einstein es que la gravedad de grandes masas como la Tierra o un agujero negro, curvan el tiempo y que de hecho es en realidad la causa del fenómeno que conocemos como gravedad.
- Einstein descubrió una ecuación precisa que describía este fenómeno, la cual podemos llamar la Ley de Einstein de la deformación o curvatura del tiempo y la podemos describir de forma cualitativa: “A todo en el universo le gusta vivir donde envejecerá más lentamente y la gravedad lo hala hacia allá”.
- Entre más lento transcurra el tiempo, más fuerte el jalón gravitacional. En la Tierra, donde el tiempo se ralentiza por sólo algunos microsegundos por día, la fuerza gravitacional es modesta. ¿No me creen? Los GPS son una prueba de esta realidad.
- En la superficie de una estrella de neutrones, donde el tiempo se ralentiza unas cuantas horas por día, la fuerza de gravedad es enorme. En la superficie (horizonte de eventos) de un agujero negro, donde el tiempo se detiene completamente, la gravedad es tan fuerte que nada puede escapar, ni siquiera la luz.
- La ralentización del tiempo es un hecho cotidiano y comprobado. El sistema de posicionamiento global (GPS) y las aplicaciones que utilizamos a diario para desplazarnos de lugar, son prueba de ello.

# Nuestra brana y el bulto



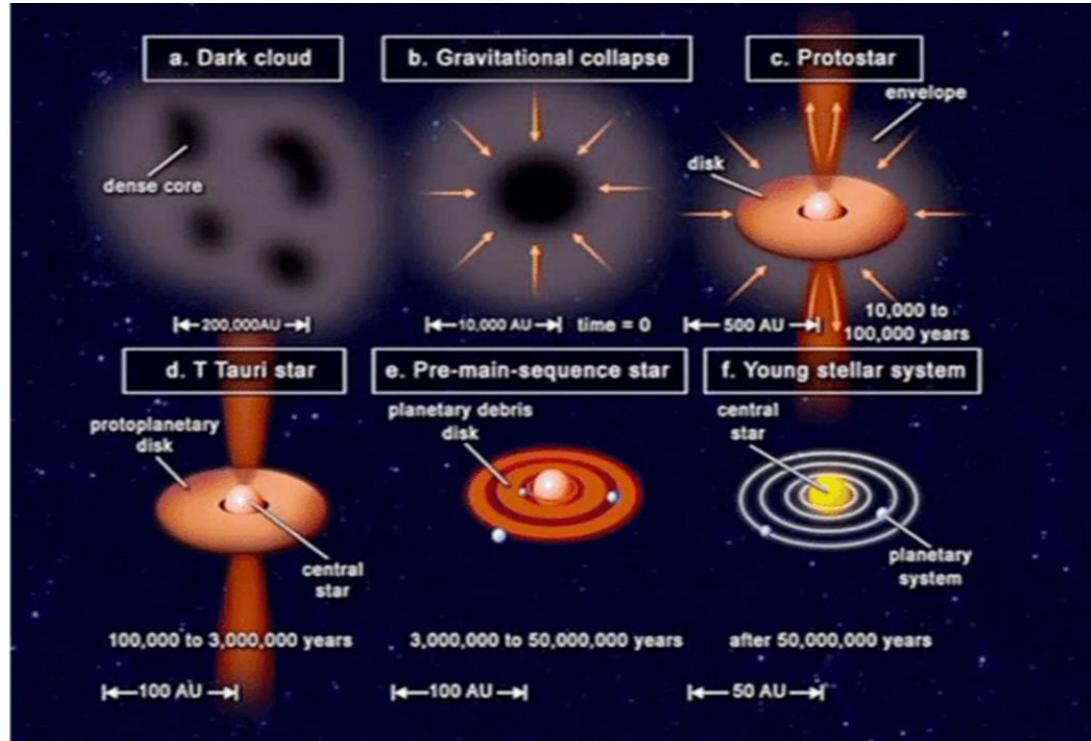
- En 1912 Einstein descubrió que si el tiempo se deforma, también el espacio debe deformarse. Pero a pesar de todo su esfuerzo, no fue sino hasta noviembre de 1915, que formuló su “ecuación de campo de la relatividad general”, la cual encapsulaba todas sus leyes relativistas, incluyendo las deformaciones del espacio. La precisión requerida de la tecnología para comprobar esta teoría no fue adquirida de inmediato, pero a través de los años, varios experimentos han confirmado que en efecto, la curvatura del universo existe.
- Pero, ¿hacia dónde se curva? ¿Y en qué se curva? Bueno, pues teorizamos que se curva dentro de un hiperespacio con dimensiones adicionales (extra o superiores), al que se le suele llamar *bulto*, el cual no es parte de nuestro universo. Nuestro universo tiene tres dimensiones espaciales (este-oeste, norte-sur y arriba-abajo). Los científicos tienden a considerar a nuestro universo como una membrana (brana) que está curvada dentro de un bulto de más dimensiones.
- Para nosotros los seres humanos, es imposible imaginar más de las tres dimensiones espaciales y una temporal; sin embargo, podemos visualizarlas matemáticamente o haciendo proyecciones tridimensionales de la misma.
- En algunos lugares del universo, la curvatura sería tan extrema, que termina en un punto infinitesimal que se denomina singularidad.

# Gravedad de Marea



- Las leyes relativistas dictan que los planetas, estrellas y cualquier otro objeto se moverá en el camino más recto a través de la curvatura del espacio-tiempo del lugar. Entre más masivo sea el objeto, mayor será la curvatura que experimente el espacio tiempo. Desde la perspectiva de otros objetos presentes en la cercanía, esta curvatura se experimentará como un incremento en la gravedad local. Sin embargo, esta fuerza cambia de forma diferencial, punto a punto.
- Pensemos en la tierra y la luna. La gravedad de luna hace más fuerte cerca del lado cercano a la luna que del lado más lejano y la dirección de la fuerza a los lados es ligeramente inclinada hacia el centro de la luna. Una dirección diferente de cada lado de la tierra.
- Ahora bien, la tierra no siente el promedio de estos jalones gravitacionales, porque está en caída libre en su órbita. Lo que si siente la tierra es un estiramiento hacia dentro y hacia afuera de la luna (en los lados opuestos) y presiona, comprimiendo los laterales. Este fenómeno causa lo que conocemos como mareas. A las fuerzas que causan esta compresión y estiramiento se les llama fuerzas de marea. Por supuesto, entre más masivo el objeto, más fuertes serán las fuerzas de marea que cause, serán más fuertes. En el caso de una agujero negro, serán de una fuerza inconmensurable.

# Formación de las Estrellas



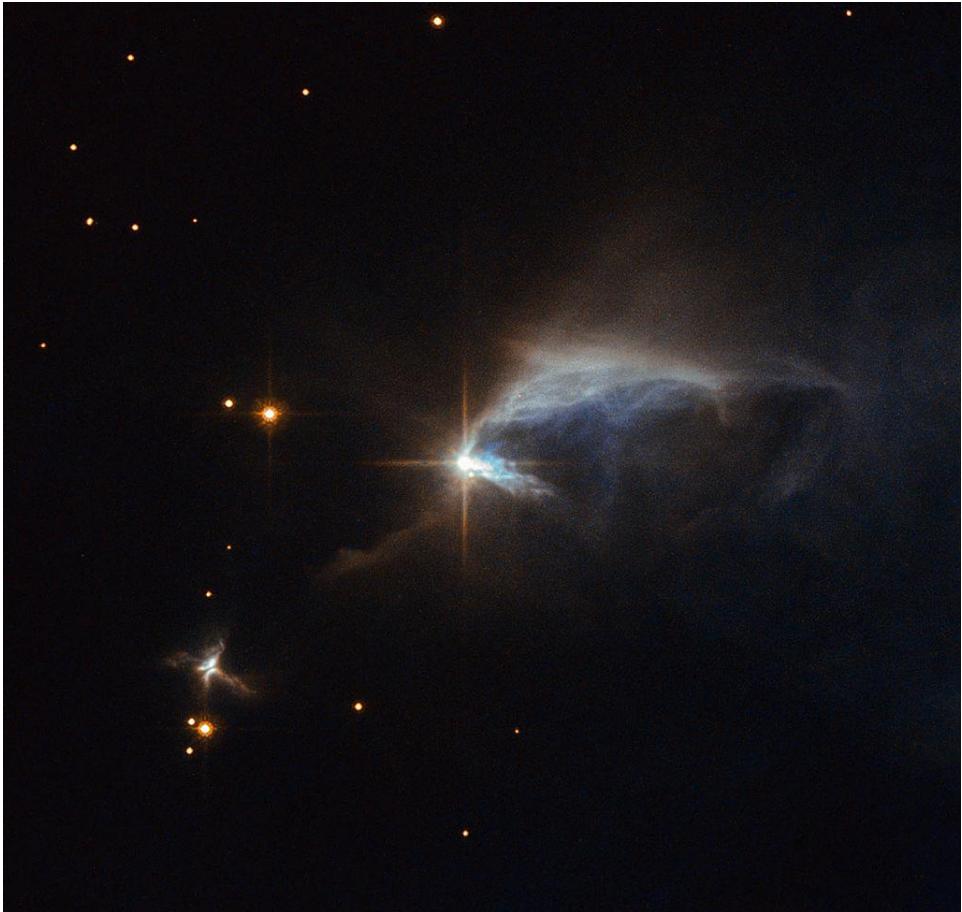
- Las estrellas se forman al condensarse las nubes de polvo estelar particularmente frías y densas, al menos a nivel de estándar interestelar.
- A estas regiones se les conoce como nubes moleculares, porque la temperatura es lo suficientemente baja para permitir que se formen las moléculas. Estas nubes son una parte del medio interestelar. Las nubes moleculares se distinguen del resto del medio interestelar por estar relativamente frías (20K a 50K) y ser densas (varios cientos de moléculas por  $\text{cm}^3$ ).
- Hay relativamente bastantes moléculas en proximidad unas de otras pero a una presión del gas relativamente baja.

# Formación de las Estrellas



- Una estrella no es más que es una gran bola de gas condensada por los efectos gravitacionales y suficientemente caliente para sostener una reacción de fusión nuclear en su centro. Produce energía al fusionar átomos de hidrógeno y convertirlos en átomos de helio en su núcleo.
- Este punto es clave, porque permite que la fuerza de atracción gravitatoria sea mayor que la fuerza repulsiva del gas, iniciando el colapso de la nube.
- En la medida que se colapsa, se libera energía potencial gravitatoria convirtiéndola en energía térmica, que a su vez incrementa la presión del gas. Esto presenta un problema: si la presión del gas no se elimina, la formación de la estrella ya no continuará.

# Formación de las estrellas



- La forma en que esta energía se libera es forma de luz, la cual puede escapar de la nube, permitiendo que continúe el proceso. Sin embargo, en la medida en que el proceso continúa, el centro se vuelve tan denso, que a la luz emitida por las moléculas y las partículas de polvo, se le vuelve más difícil escapar de la región central de la estrella.
- A mayor densidad (de partículas), mayor absorción de luz y por lo tanto, nuevamente mayor conversión en energía térmica. A medida que pasa el tiempo, la densidad de la nube resultará en que toda la conversión subsecuente de energía de regreso a energía térmica. Y quedará atrapada en la región central. Cuando esto ocurre, la condensación de la nube se detiene. Al objeto en esta etapa se denomina, protoestrella.
- Vistas desde un telescopio, las protoestrellas parecen estrellas comunes y corrientes, con luminosidad y temperatura en superficie similares. La diferencia se encuentra en el interior, pues las protoestrellas no están suficientemente calientes para sostener la fusión nuclear.

# Formación de las estrellas



- Para conseguir encender su horno nuclear, las protoestrellas deben seguir acumulando más material y comprimiéndolo. En la medida que consigue más material del medio, la gravedad causa que la protoestrella se contraiga y la tasa de fusiones nucleares se incrementa y el calor generado por estas reacciones causa suficiente fuerza para contrarrestar la contracción ocasionada por la gravedad.
- Cuando el centro estelar alcanza alrededor de 1 millón de kelvin, el viento estelar generado en la superficie estelar se lleva el gas y polvo, con lo se acaba la fase acreción. Aún sin este material adicional, la protoestrella continúa contrayéndose hasta que el núcleo estelar alcanza una temperatura de 10 millones de kelvin. En este punto, el horno de fusión nuclear se estabiliza y tenemos una estrella completa.
- En esta etapa se logra un balance entre la presión generada por las fusión nuclear (expansiva) y la presión (contractiva) debida a la gravedad. Este equilibrio evita que la estrella siga contrayéndose por la gravedad. A este estado se le conoce como *equilibrio hidrostático*. La fuerza neta experimentada por el material en la estrella es cero.

# Formación de estrellas



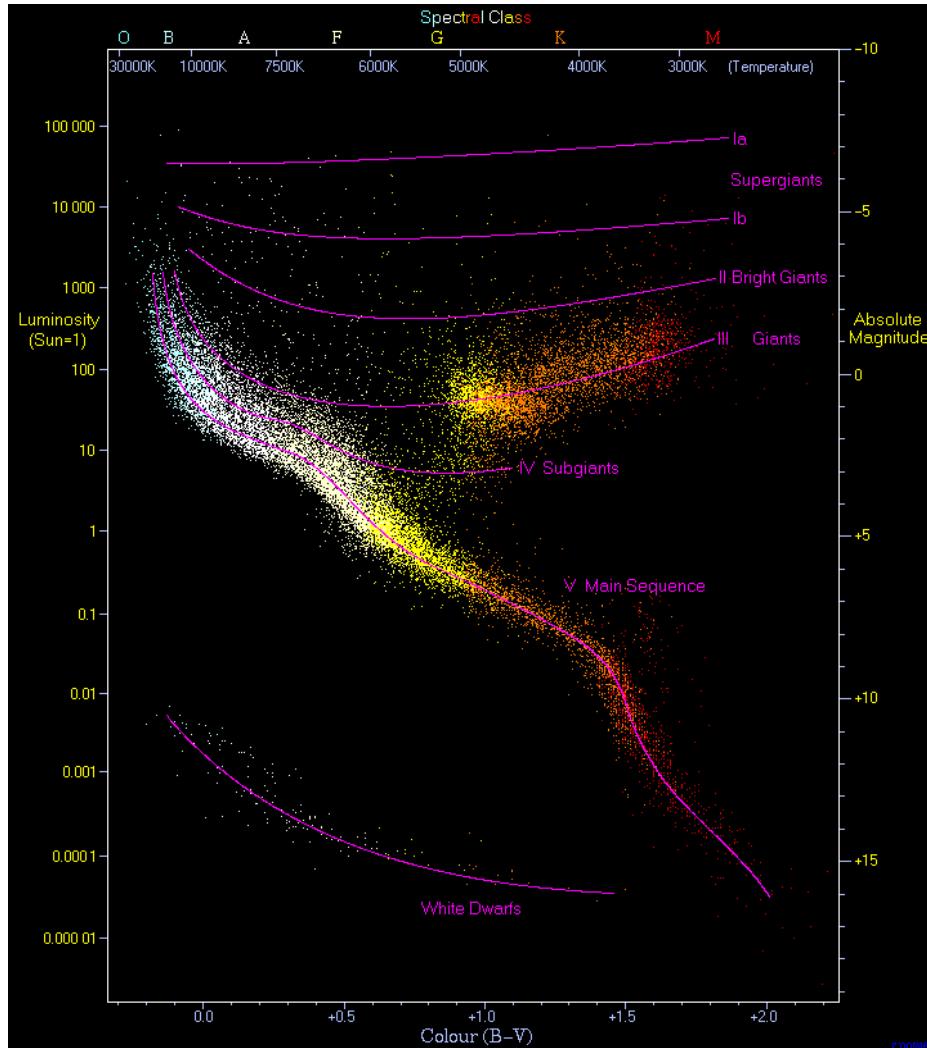
- Hay otros aspectos a considerar que contribuyen a la dinámica de la formación de las estrellas. La gravedad de otras estrellas en formación o ya formadas, otras nubes moleculares, campos magnéticos (vuelven más lenta la contracción), la fricción (también causada por los campos magnéticos, hace que las partículas se muevan de tal manera que ayudan a contrarrestar los efectos de la gravedad) por último y la turbulencia también juega un papel. Grupos de gas moviéndose de forma diferente generan fuerzas de corte que tienden a disolver la nube más que ayudar a su contracción.
- En las últimas etapas de la formación de la protoestrella, el material alrededor se formará en un disco y la protoestrella eyectará material a través de chorros generados en la estrella.
- Pero, ¿cómo es que algunas estrellas terminan en un fin tan violento como el necesario para crear un agujero negro?

# Finales violentos

- Los agujeros negros de tamaño estelar son uno de los dos posibles productos de las explosiones de estrellas de gran masa que ocurren al final de la vida de una estrella.
- A estas explosiones, se les llama *supernovas* de colapso de núcleo o supernovas tipo II. Este fenómeno ocurre en estrellas que tienen al menos 8 veces la masa del Sol.
- La energía liberada en estos eventos es del orden de  $10^{46}$  joules. Equivale a dotar a nuestro Sol de energía para funcionar 825 mil millones de años (a su tasa actual de entrega de energía).
- (Nuestro sistema solar ha existido por sólo 5 mil millones de años), y el universo 13.8 mil millones de años.

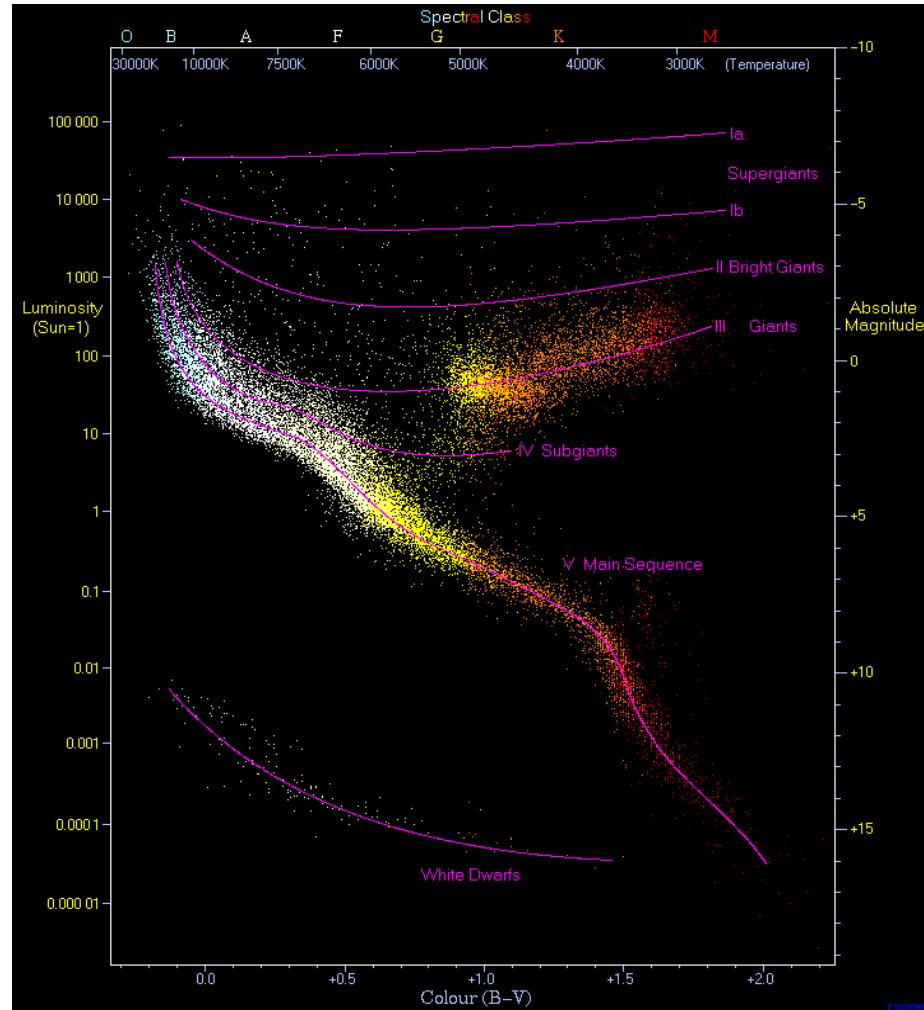


# La secuencia principal



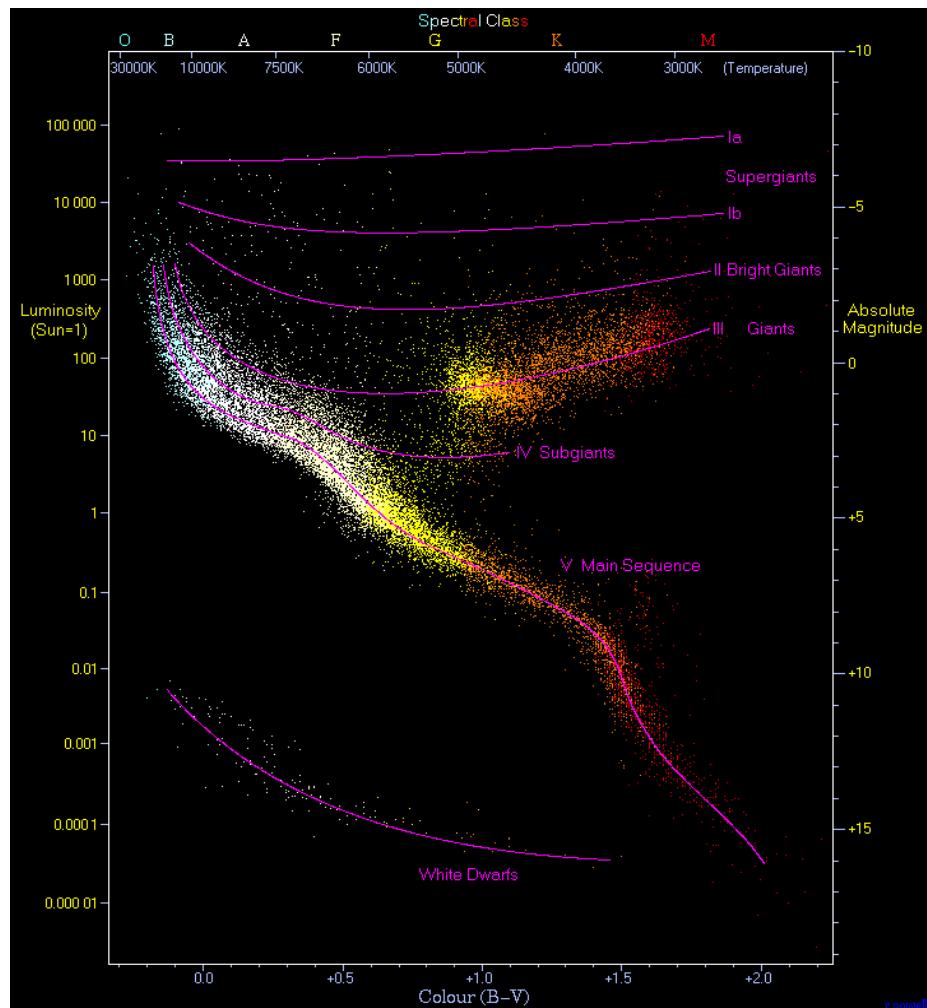
- Un diagrama Hertzsprung–Russell grafica la luminosidad real de la Estrella o la magnitud absoluta contra su índice de color (representada como B-V) y temperatura en kelvins. En particular este gráfico muestra 22,000 estrellas del catálogo Hipparcos junto con 1,000 estrellas de baja luminosidad (enanas rojas y blancas) del catálogo Gliese de estrellas cercanas.
- La secuencia principal es visible como una banda diagonal prominente que corre desde la parte superior izquierda a la parte inferior derecha.
- En la parte inferior derecha, se encuentran las estrellas de baja luminosidad y baja temperatura hasta las de alta luminosidad y alta temperatura en la esquina superior izquierda. Todas estas estrellas provienen del mecanismo discutido previamente. Las tasas de fusión se han estabilizado en sus núcleos. La secuencia principal de la vida de una estrella es decir el período comprendido entre su formación y su muerte, es el período más largo. Los científicos consideran como la muerte de una estrella cualquier final como la formación de una enana blanca, una estrella de neutrones o un agujero negro. Durante la secuencia principal, la estrella consume el hidrógeno convirtiéndolo en helio. A medida que las estrellas envejecen, van dejando la secuencia principal, consumiendo otros elementos también.

# La secuencia principal



- Mientras las estrellas están en la secuencia principal, hay una relación muy fuerte entre su masa y luminosidad. Entre mayor sea su masa, más luminosa será. La intensa gravedad de una estrella de gran masa implica que su núcleo, será más denso y como resultado, más caliente. Esto es importante pues la tasa de fusión, es decir, la tasa a la que la energía es producida, es altamente dependiente de la temperatura del núcleo, por lo tanto entre más masa, se produce más energía por unidad de tiempo y en la medida en que esta energía deja el núcleo y eventualmente llega a la superficie, observamos una mayor luminosidad, es decir una estrella más brillante.
  - Los científicos utilizan mucho el color de las estrellas para referirse a ellas. Cuando hablamos de color, hablamos de luz, es decir de radiación electromagnética. Pero la radiación electromagnética la podemos visualizar como una banda continua, un espectro continuo, dentro del cual la luz visible es sólo una pequeñísima parte que va desde El rojo en el extremo inferior (longitud de onda alrededor de 740 nm) y el violeta en el extremo superior (longitud de onda alrededor de 380 nm).

# La secuencia principal

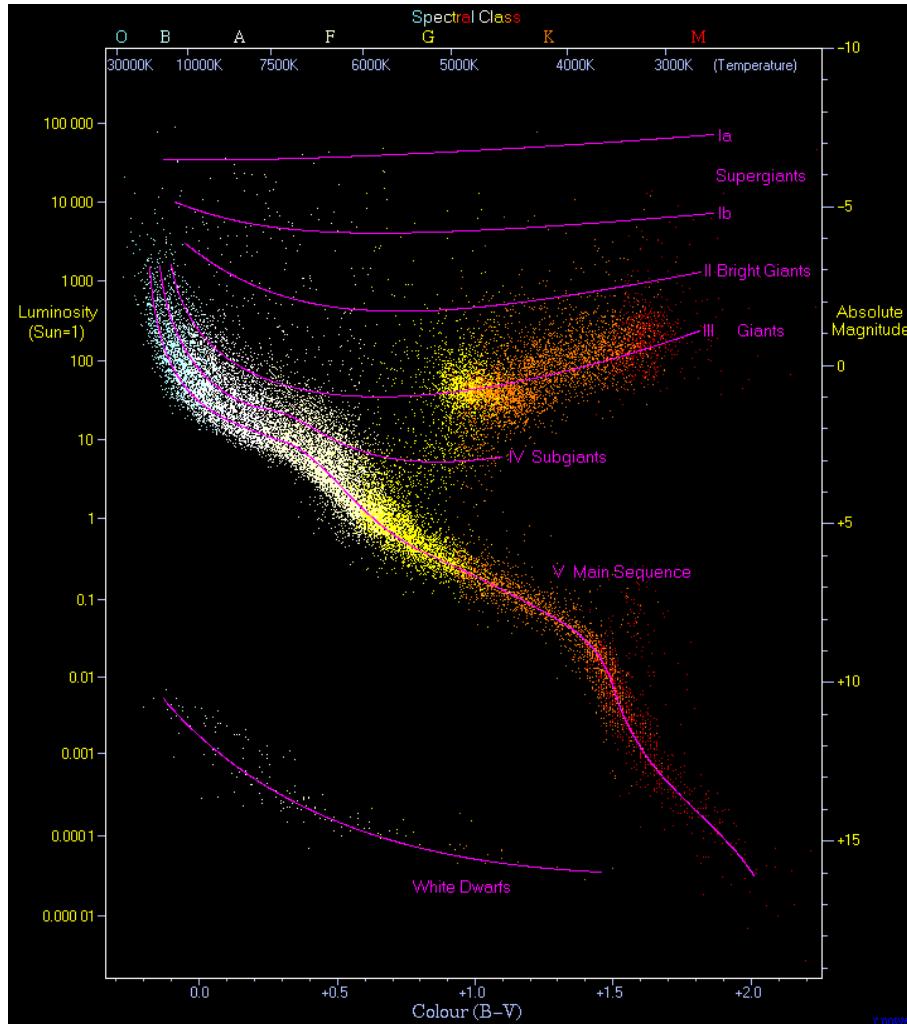


- Cuando nos referimos al color de una estrella, lo que estamos diciendo es que la mayor parte de su radiación viene de ese segmento en particular del espectro visible. Sin embargo, todas las estrellas producen un poco de luz visible de todo el espectro.
- Las estrellas más calientes son las hipergigantes azules, las cuales superan los 40,000 grados centígrados en su superficie, y que pueden brillar 5 millones de veces más fuerte que nuestro Sol.
- Todas las estrellas tienen una longitud de onda en la cual producen más luz que en otra frecuencia. Estos máximos de longitud de onda están relacionados directamente con la temperatura de la superficie de la estrella. Esto se puede estimar con la ley de Wien, la cual tiene esta forma

$$\lambda_{pico} = \frac{0.002898 m \cdot K}{T}$$

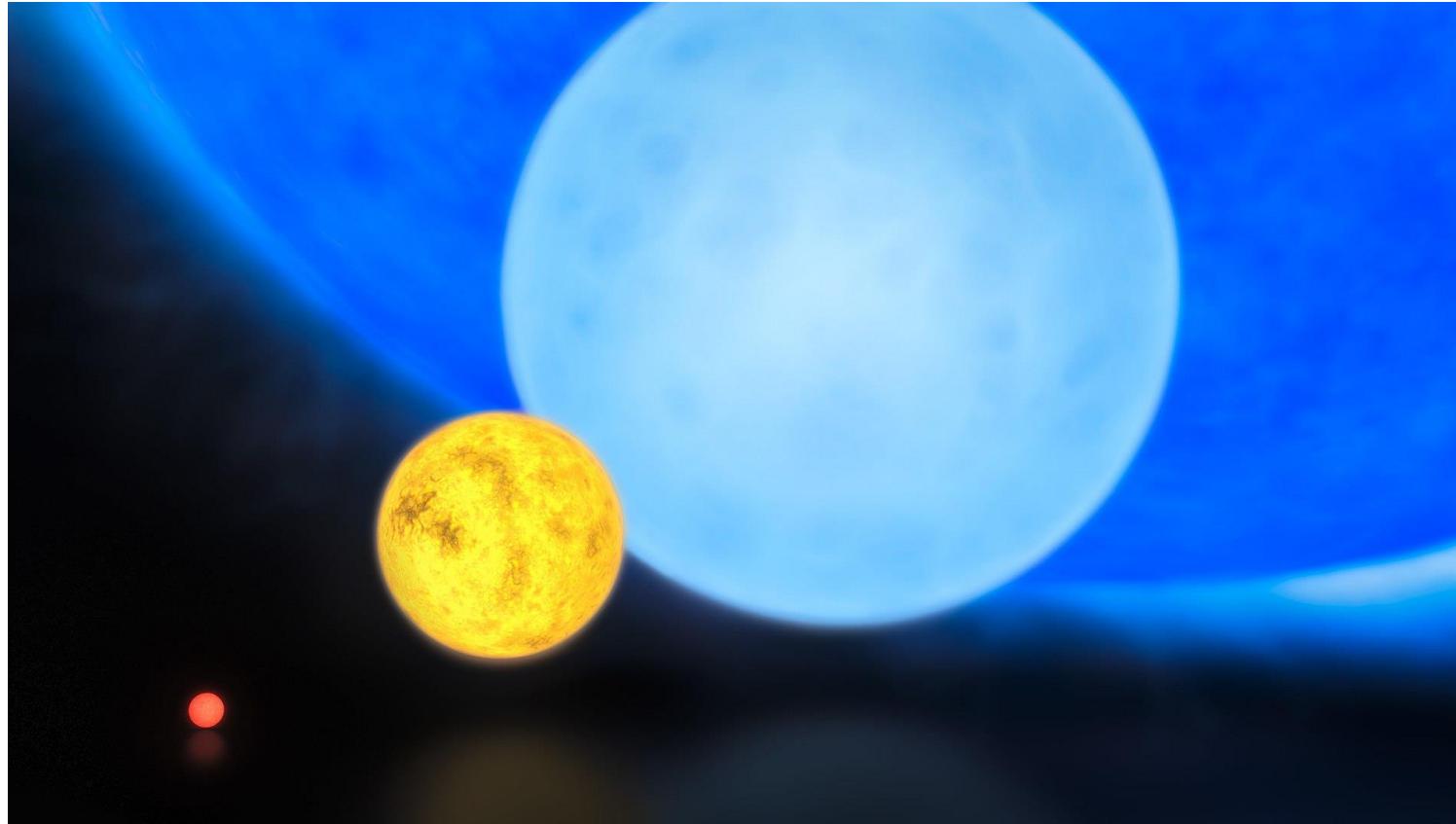
Donde T es la temperatura en K del cuerpo negro emisor de radiación .

# La secuencia principal



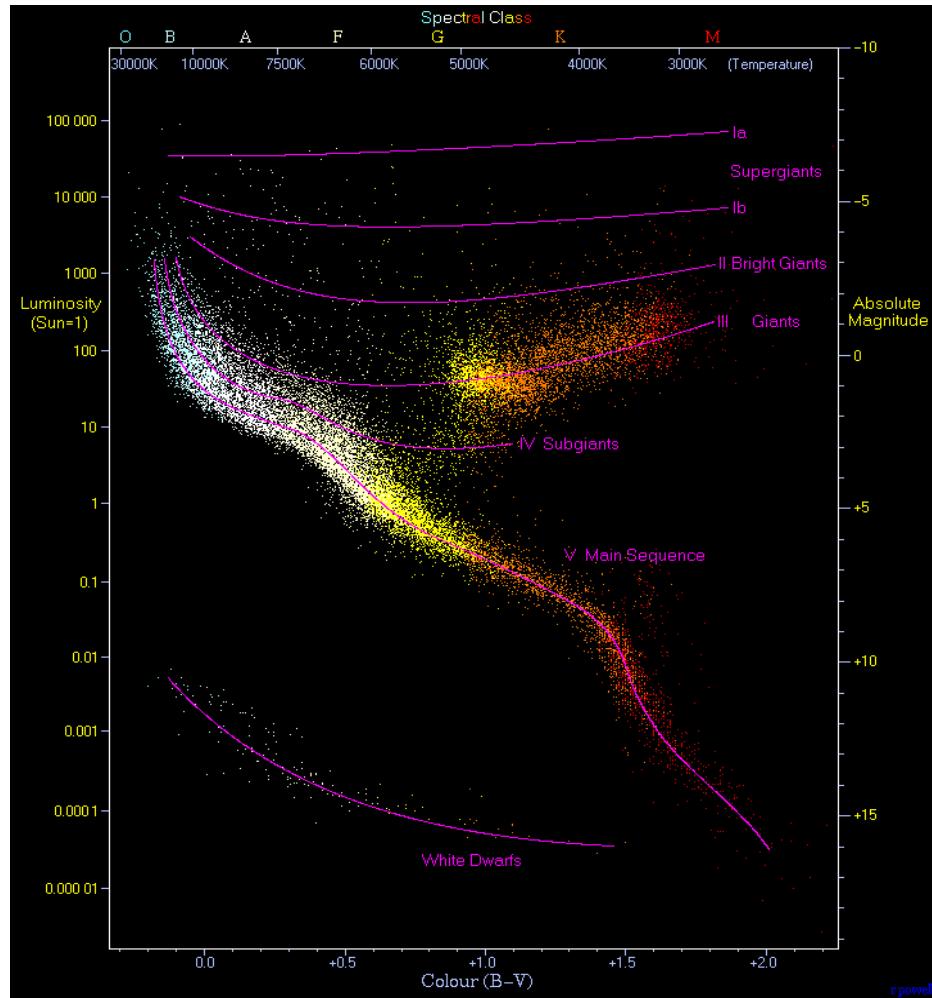
- Las estrellas más masivas son más brillantes porque son más luminosas como resultado de tener tasas de fusión más altas, por lo que, aunque tienen más material para consumir, las estrellas más masivas tienen vidas más cortas. Una estrella azul puede permanecer en la secuencia principal alrededor de 10 millones de años, mientras que una estrella roja puede vivir más de un billón (1,000,000,000,000) de años. Las estrellas azules serían literalmente como estrellas de rock: Viven rápido y mueren jóvenes. Mientras que las estrellas rojas viven vidas largas y sin sobresaltos.
- Nuestro Sol es una estrella bastante promedio, ni muy fría ni muy caliente. Curiosamente, la luz del Sol alcanza su máximo alrededor de los 500 nm, lo cual es un color amarillo-verdoso. La vemos blanca, porque emite radiación en todo el espectro. En términos de masa, nuestro Sol está más cercana al lado inferior del espectro posible para una estrella de secuencia principal. En el lado superior, las estrellas azules masivas pueden ser unos cuantos cientos de veces más masivas que nuestro Sol, mientras que en el lado inferior, una estrella roja puede tener una masa de solo un décimo de la masa de nuestro Sol.

# La secuencia principal



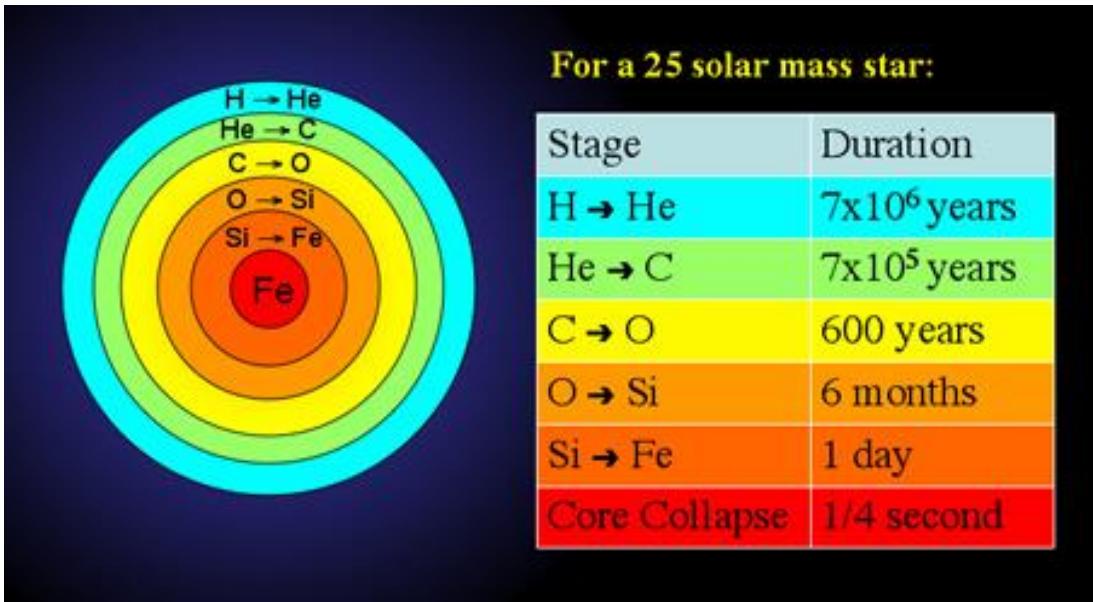
La estrella más masiva (no la más voluminosa) que conocemos a esta fecha es una estrella que vive en el borde de nuestra galaxia. Esta estrella se llama R126A1, pero de manera afectuosa se le llama Rob (256 masas solares, luego de haber perdido unas cuantas masas a través de su vida, aproximadamente un 20%, lo que quiere decir que al inicio Rob tenía alrededor de 320 masas solares ).

# La secuencia principal



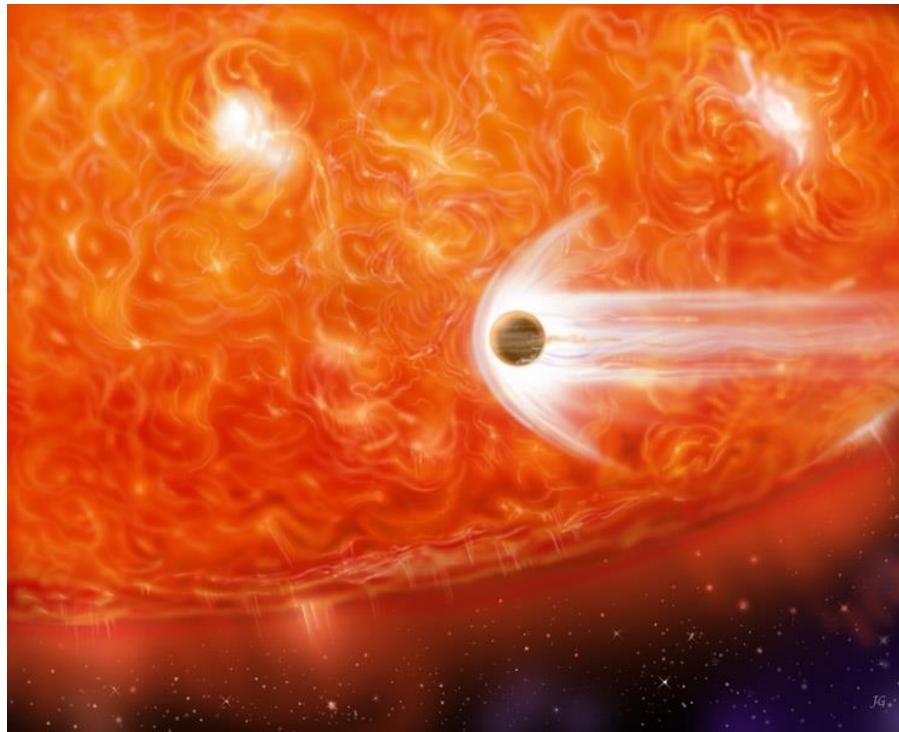
- A medida que la estrella va terminando su dotación de hidrógeno en su núcleo, la estrella se va enfriando; así que vemos que se mueve hacia la derecha en el diagrama, fuera de la banda de las estrellas en la diagonal principal, convirtiéndose en gigante roja.
- La muerte de una estrella comienza cuando deja la seguridad de la secuencia principal, en ese momento en el diagrama se verá que se desplaza hacia la derecha. La estrella se verá más roja.

# La muerte de la estrella



- En su interior, lo que está sucediendo es que al agotarse el combustible nuclear (hidrógeno específicamente), el núcleo no puede sostener la fuerza que equilibra a la gravedad que está atrayendo todo hacia adentro. La estrella no podrá mantener el equilibrio hidrostático en ese momento. Esta perdida de presión de radiación resultará en el colapso del núcleo de la estrella. Lo anterior, ocasionará que la temperatura del interior se incremente.
- Cuando esto ocurre, el núcleo se contraerá hasta alcanzar unos 100 millones de grados centígrados. A esa temperatura, la estrella comienza a fusionar un nuevo tipo de combustible: el helio de su núcleo, al cual convierte en un nuevo elemento: carbono, y algunas cantidades menores de otros elementos.
- Esta fase de la vida de la estrella será más corta y una vez que esto ocurra, el núcleo nuevamente colapsará y si la temperatura alcanza los 600 millones de grados centígrados, la estrella comenzará a fusionar el carbono. En esta etapa, tendríamos capas sucesivas en el núcleo, formadas por capas de carbono, helio e hidrógeno. Este proceso se repite hasta que se forman neón, oxígeno, magnesio y silicio, y el núcleo se vuelve cada vez más pesado. Cada etapa es más rápida, el carbono podría consumirse en unos cuantos cientos de años, mientras que el silicio podría consumirse en un día. Este punto es crítico, pues al consumirse el silicio y fusionarse, se obtendrá hierro, del cual no puede extraerse más energía ni por medio de la fusión o fisión nuclear. La fusión por lo tanto cesará y la estrella morirá.

# La muerte de una estrella



Desde la perspectiva del exterior de la estrella, la energía proveniente del colapso del núcleo, provocará que el envoltorio, es decir la parte de la estrella no involucrada en la fusión nuclear, se expanda. En la medida que este se vuelve menos denso se enfriá y se vuelve más roja.

Veríamos que la estrella se vuelve más roja. En el diagrama HR, veríamos que la estrella se aparta de la secuencia principal y se vuelve una gigante roja o si el tamaño es suficiente una supergigante.

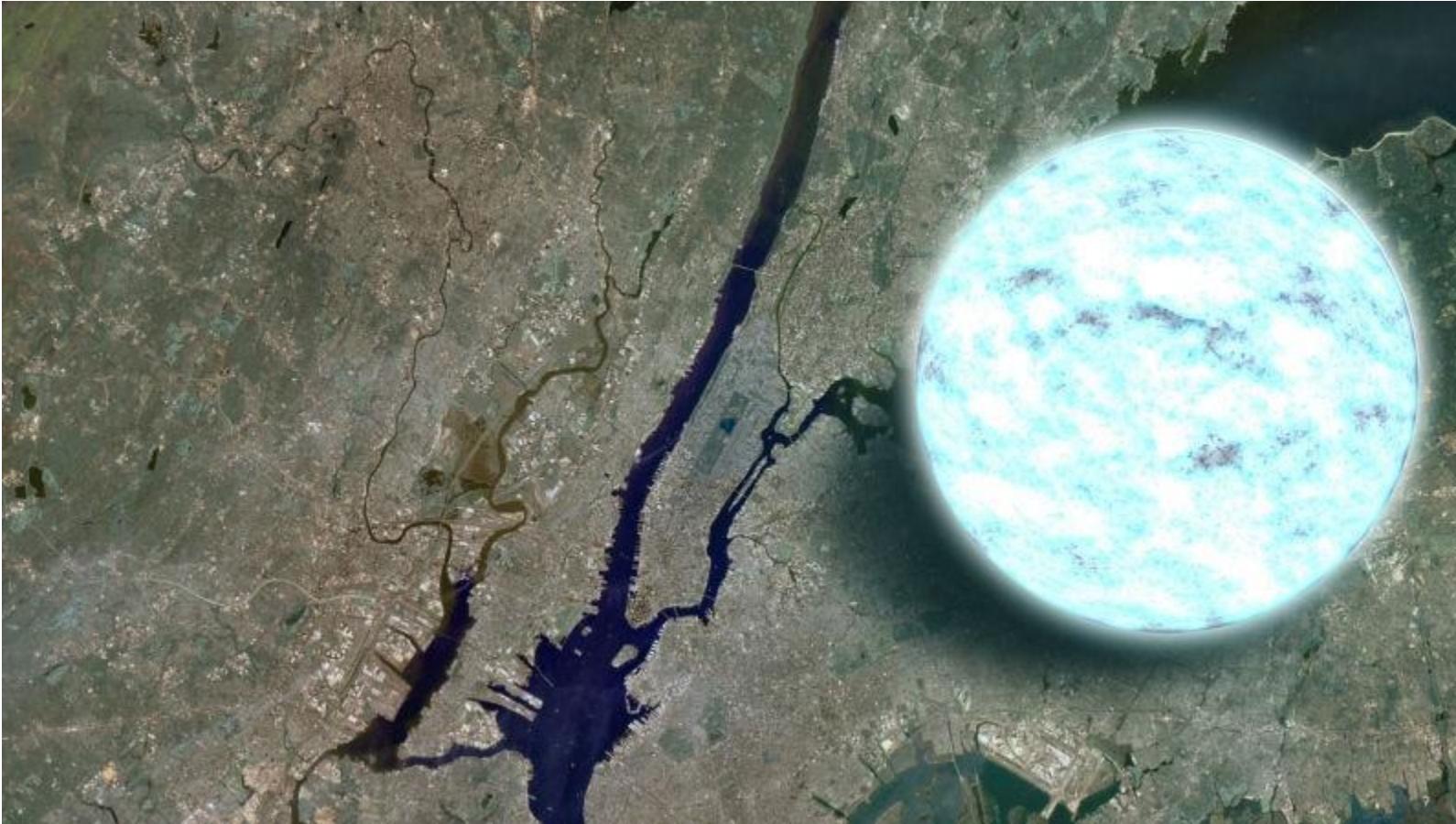
Concentrémonos en la muerte de las estrellas de rock, las gigantes. Al morir, sus explosiones son tan violentas que pueden ser vistas desde otras galaxias. Estas estrellas consumen su dotación de hidrógeno a un paso más acelerado, dejando la secuencia estelar en el peor de los casos en sólo un millón de años. Entre más masiva sea la estrella, más capas acumulará en su núcleo antes de morir.

# La muerte de estrellas masivas



- Las estrellas de gran masa, es decir, que tienen más de ocho veces la masa de nuestro Sol, viven a través de varias etapas de gigantes rojas, donde van acumulando capas como hemos visto. Una vez que se forma el núcleo de hierro y níquel, las reacciones nucleares ya no son posibles, y la estrella desarrolla una crisis energética.
- Los científicos no tienen claridad de todos los detalles, pero se piensa que si la masa inicial de la estrella no superaba las 30 masas solares, entonces, al colapsar y volverse más densa, si las condiciones son propicias, el colapso eventualmente termina y la estrella se convierte en los que se conoce como una estrella de neutrones.
- Una estrella de neutrones tiene una superficie dura. Cuando ocurre el colapso, el gas de las capas exteriores golpea esta superficie dura y rebota, golpeando el gas que viene cayendo. Esta colisión causa una explosión. Este es el detonador de una supernova de colapso de núcleo, también conocida como supernova tipo II.
- Los neutrones no suelen encontrarse fuera de los núcleos de los átomos. Esto es porque son demasiado inestables cuando se encuentran aislados y decaen, creando protones y electrones. Sin embargo, durante el colapso de una estrella masiva, los protones y electrones se encuentran sujetos a tal presión y en un volumen tan pequeño, que pueden combinarse para formar neutrones.

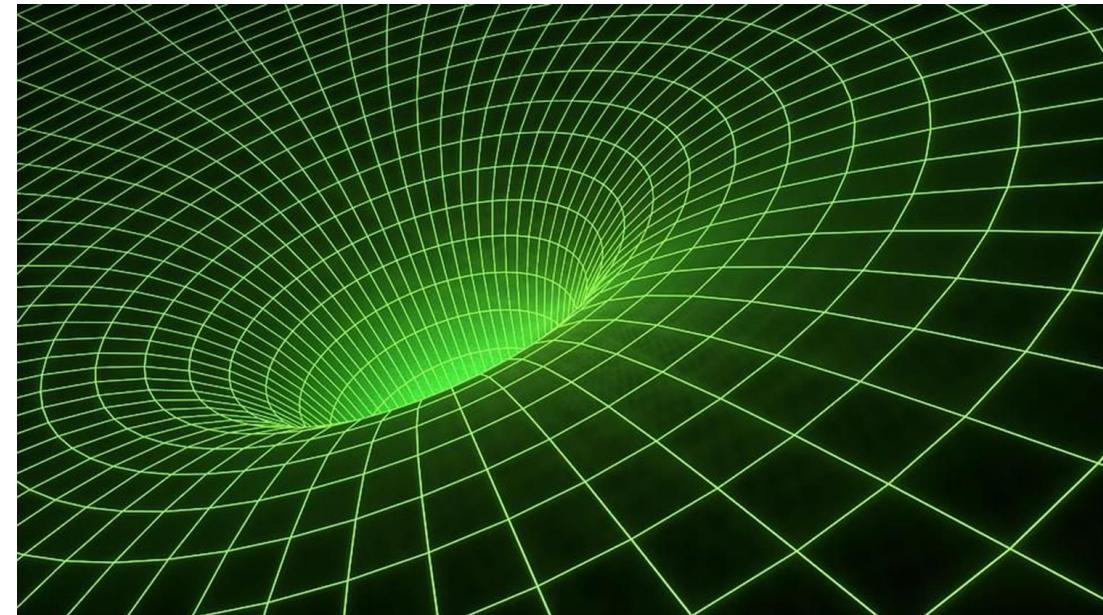
# La muerte de estrellas masivas



- La masa máxima de una estrella de neutrones es un parámetro crítico para determinar agujeros negros. Frecuentemente identificamos candidatos a agujeros negros a través de la observación de estrellas binarias que emiten rayos X. Como las propiedades de emisión de rayos X de las estrellas de neutrones y los agujeros negros son muy parecidas, una forma de identificar si se trata de uno u otro es a través de su masa. Si la masa del emisor de rayos X tiene una masa que supera las 3 masas solares, se trata de un agujero negro. Si se encuentra debajo de las tres masas solares, dado que puede tratarse de un agujero negro o una estrella de neutrones, hay que encontrar otra forma de determinar de cuál caso se trata, por ejemplo, a través de la emisiones de pulsaciones periódicas, lo que identificaría a una estrella de neutrones.
- ¿Qué tan masiva tiene que ser una estrella gigante para crear un agujero negro al colapsar? No se tiene tampoco claridad sobre esto. Sin embargo, actualmente se piensa que una estrella de 30 o más masas solares creará un agujero negro al colapsar.
- A la fecha, no se han podido identificar agujeros negros dentro de supernovas. Aunque, , lo anterior puede deberse sencillamente a lo difícil de detectarlos. Otra posibilidad es detectarlos a través de la explosiones de rayos gamma. Se cree que algunas de estas explosiones, son supernovas ultrabrillantes. A estas supernovas se les conoce como *hipernovas*. Es muy posible que estas hipernovas den como resultado agujeros negros.

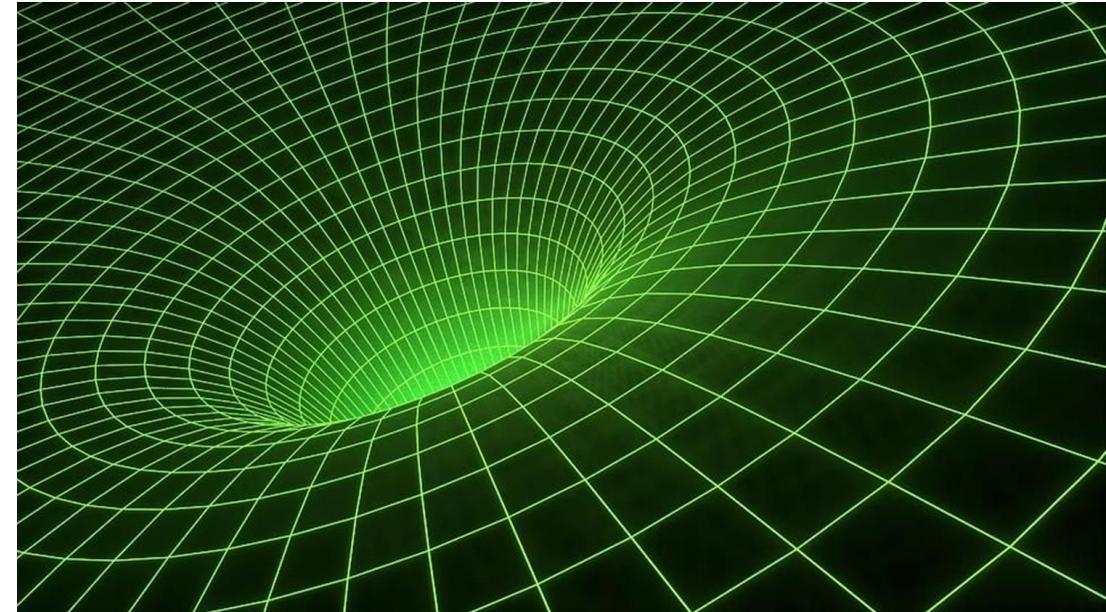
# La muerte de estrellas supermasivas

- En nuestra experiencia regular tendemos a ver al espacio y al tiempo, como entidades separadas. Sin embargo, las teorías de Einstein de la Relatividad Especial y General, demostraron que diferentes observadores pueden no coincidir en las medidas del espacio y del tiempo. Sin embargo, en lo que sí pueden coincidir es una mezcla de ambos conceptos denominada espacio-tiempo. Las teorías relativistas explican por qué la velocidad de la luz es el límite de velocidad dentro del universo y por qué los relojes en movimiento se retrasan respecto a relojes estacionarios.
- Una de las conclusiones de Einstein es que no existe tal cosa como un tiempo o distancia universal.
- La relatividad especial introdujo el concepto de intervalo de espacio-tiempo invariante. Por ejemplo si dos astronautas viajan a diferentes velocidades y experimentan diferentes intervalos de tiempo en su viaje, en esencia están intercambiando distancia por tiempo o viceversa. Están experimentando una distorsión del espacio-tiempo. Esto es necesario para que todos puedan coincidir en la velocidad de la luz. Einstein se dio cuenta que podía explicar la gravedad combinando el principio de equivalencia con el concepto de intervalo invariante de espacio-tiempo, utilizado en la relatividad especial. Cuando desarrolló la teoría general de la relatividad se dio cuenta que la gravedad es la curvatura del espacio-tiempo. Entre más grande la masa, más grande la curvatura. Esta curvatura del espacio tiempo causa que los objetos se muevan en trayectorias curvas alrededor de objetos masivos. A la distancia más corta entre dos puntos en una superficie curva se le conoce como geodésica.

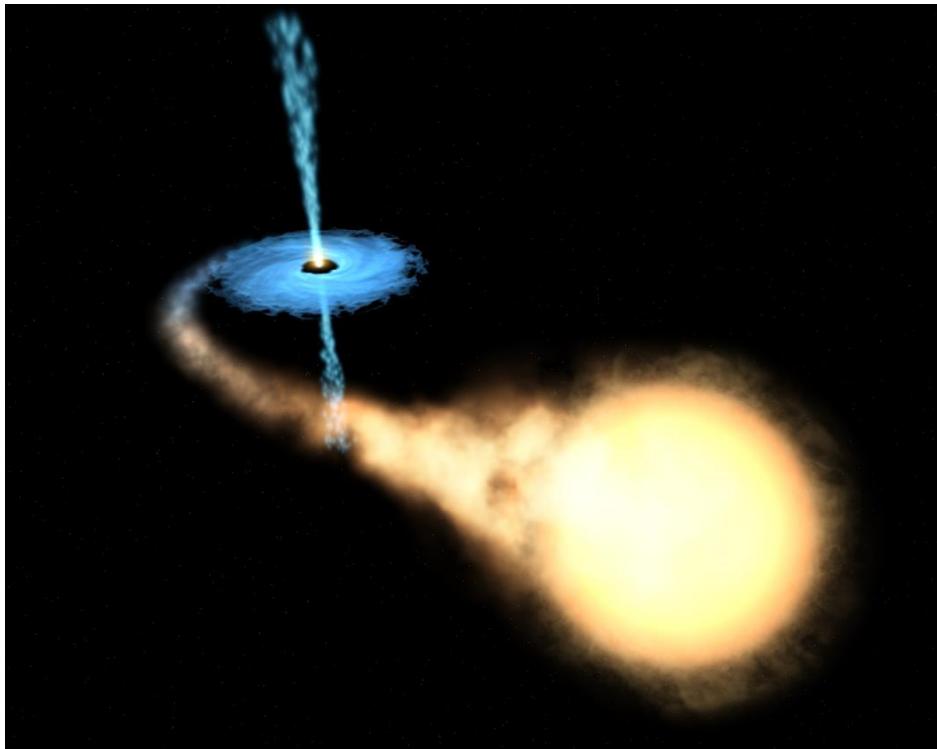


# La muerte de estrellas supermasivas

- Las curvaturas más extremas del espacio tiempo ocurren por supuesto en los agujeros negros. No solo curvan el espacio-tiempo, sino que lo curvan a tal punto que incluso la luz viajará en trayectorias altamente curvas.
- Los fotones por definición viajan en trayectorias geodésicas en el espacio-tiempo. Cerca de un agujero negro, la curvatura es tan alta que la luz se dobla en trayectorias que terminan todas en la singularidad del agujero negro. Es necesario entender que la curvatura del espacio-tiempo no solo afecta el espacio, sino que también el tiempo.
- Los agujeros negros representan espacio-tiempo que está tan curvado, que ni siquiera la luz puede escapar de ellos. Se dice normalmente que los agujeros negros no tienen pelo. Sus propiedades dependen solamente de su masa, su momento angular y carga eléctrica.



# Agujeros negros de todos los tamaños

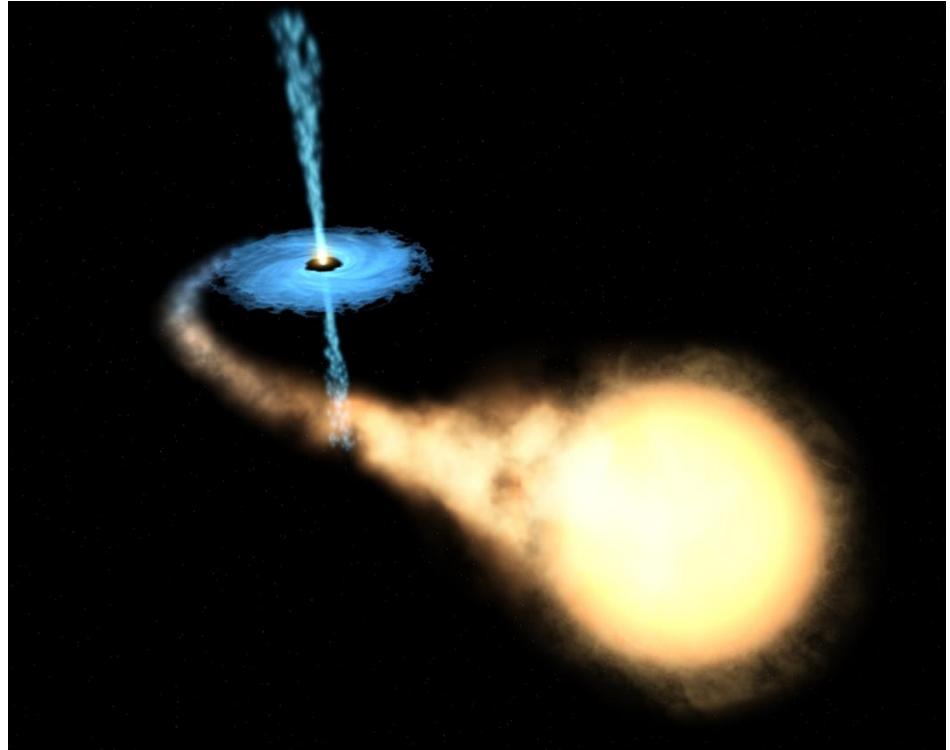


- Por su masa, dividimos a los agujeros negros en agujeros negros estelares (provenientes de estrellas colapsadas, siguiendo el proceso ya discutido), agujeros negros de masa intermedia y agujeros negros súper masivos.
- Ahora, un problema con los agujeros negros, es que realmente no tienen una frontera dura. No son como un planeta o una estrella. Un astronauta incauto, puede literalmente caer en ellos. Debe recurrirse a un cálculo de su masa, para determinar realmente hasta donde llegan.
- Una solución de las ecuaciones de la relatividad general de Einstein, descubierta por el astrónomo alemán Karl Schwarzschild, nos permite determinar el punto de no retorno. A esto se le conoce como el radio de Schwarzschild y relaciona la masa del agujero negro con su horizonte de eventos (el punto del cual ni siquiera la luz puede escapar).

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

- Ahora bien, un agujero negro, como se obtiene de los cálculos de Schwarzschild, es un agujero negro que no rota, pero en realidad, esto no es muy realista.

# Agujeros negros de todos los tamaños



- Pero para obtener más información sobre el agujero negro, necesitamos obtenerla de otro lado, por lo que es muy conveniente el hecho que alrededor del 50% de las estrellas del universo sean estrellas binarias. Estas estrellas binarias pueden estar formadas por cualquier tipo de estrellas, incluyendo estrellas de neutrones y agujeros negros. Al medir la masa de los componentes, podemos determinar si uno de los integrantes del par, es un objeto compacto, como una estrella de neutrones o un agujero negro. Como hemos visto anteriormente, la masa máxima que puede tener una estrella de neutrones es 3 masas solares. Si el componente no visible de una estrella binaria tiene una masa de 3 o más masas solares, podemos con seguridad establecer que se ha encontrado un agujero negro.
- Para esta determinación de la masa, nos auxiliamos de las leyes de Kepler del movimiento planetario. En especial, de la tercera ley, la cual establece que la suma de la masa de dos objetos es igual al cubo de la distancia entre ambos dividida entre el cuadrado del tiempo que tardan en orbitar el centro de masa común, a esto último se le conoce también como período orbital.
- Casi todo lo que sabemos de los agujeros negros estelares proviene de la información que proviene de los que se han encontrado en pares binarios. Sin embargo, eso no quiere decir que todos los agujeros negros de tipo estelar provengan de estos pares. Es posible que de hecho, la gran mayoría de agujeros negros provengan de estrellas aisladas.

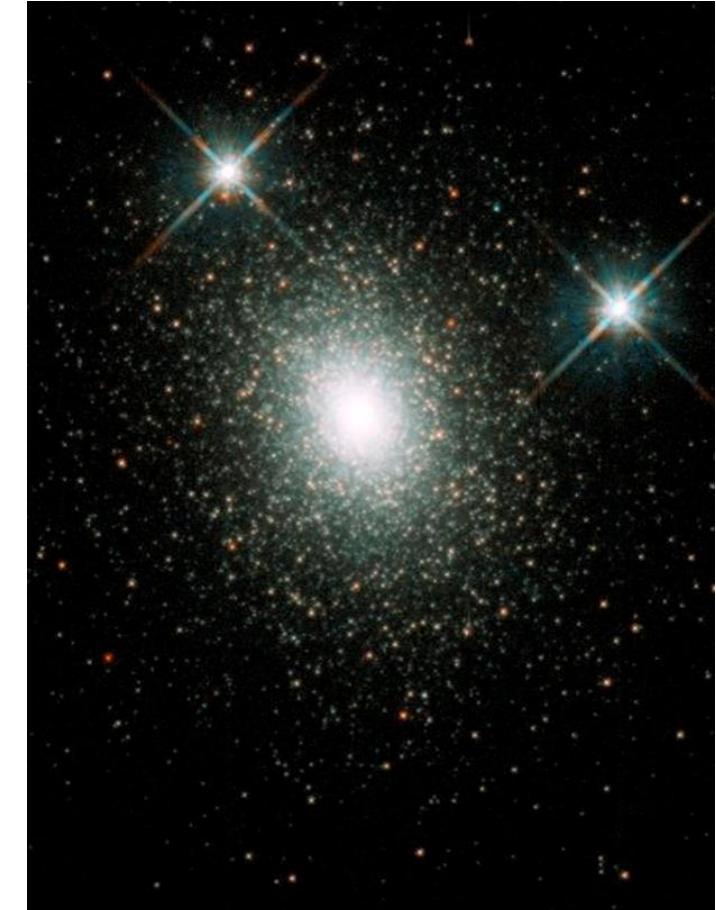
# Agujeros negros de todos los tamaños



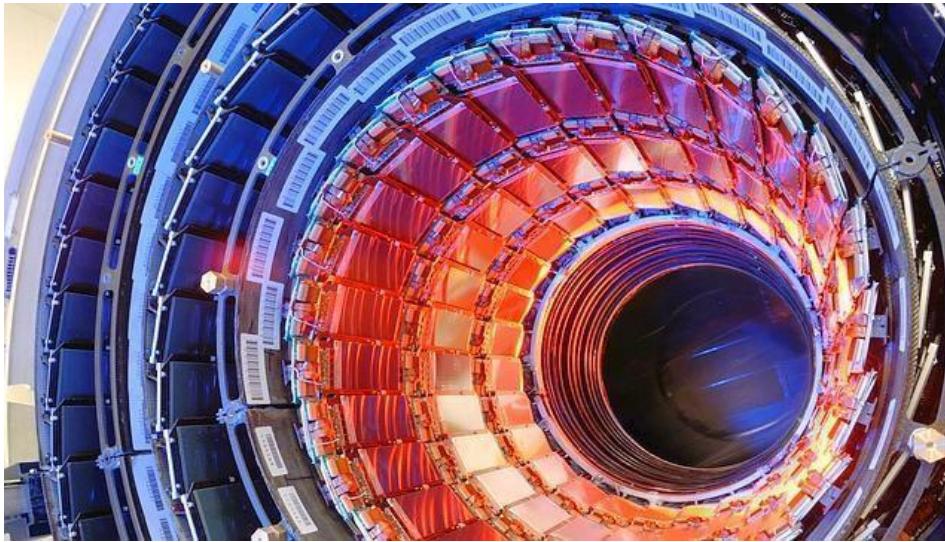
- En los años 60 comenzaron a encontrarse algunos objetos muy brillantes que inicialmente se denominaron cuásares, pues eran objetos que parecían estrellas pero que tenían algunas características bastante peculiares. Más tarde se descubrió que en realidad, no se trataban de estrellas, sino de centros de galaxias. Coincidentemente muchos de estos centros galácticos emiten muchas ondas de radio (cosa típica en las estrellas, las cuales emiten casi toda su radiación en frecuencias superiores).
- El modelo unificado actual para un centro galáctico establece que en realidad, lo que hemos estado observando son varias perspectivas de un mismo tipo de objeto. Dependiendo del ángulo se vería un quasar, o un blasar, una galaxia de emisión de radio, un disco de acreción con un jet, pero en realidad se trata de lo mismo: un agujero negro súper masivo en el centro de la galaxia.
- Una característica que tienen en común estas galaxias activas es que el agujero negro súper masivo está consumiendo una gran cantidad de gas para alimentar toda la salida de energía. Adicionalmente, esto provoca que los agujeros negros sigan creciendo. De hecho, una de las teorías con respecto a estos agujeros negros supermasivos es que crecieron a partir de agujeros negros estelares o de tamaño medio.
- ¿Qué tan masivos son estos agujeros negros supermasivos? Para poner un ejemplo, la masa del agujero negro supermasivo existente en nuestra galaxia, Sagitario A\*, tiene una masa igual a 4 millones de masas solares. Sin embargo, este monstruo es solo un pequeño espécimen de los existentes en otras galaxias. Por ejemplo, el agujero negro existente en la galaxia M87 tiene una masa equivalente a 7 mil millones de masas solares.

# Agujeros negros de todos los tamaños

- Agujeros negros de tamaño intermedio.
- Con toda la investigación que se ha hecho hasta la fecha, hemos observado agujeros negros con masas que oscilan entre las 5 y 20 masas solares hasta algunos que alcanzan unas 70 a 80 masas solares; a estos son los que hemos denominado agujeros negros estelares.
- Por otro lado, observamos agujeros negros supermasivos con millones de veces la masa de nuestro sol. Entre estos dos extremos hay mucho espacio. A un agujero negro en esta franja, se le denominaría agujero negro de tamaño intermedio. A la fecha, no se ha observado este tipo de agujeros negros, pero se teoriza que podrían provenir de las primeras generaciones de estrellas, donde la masa de la misma podría ser tan grande que podría causar un colapso directo de la estrella hasta un agujero negro. Adicionalmente, habría formas indirectas de crear este tipo de agujeros negros, a partir de la fusión de dos agujeros negros más pequeños, provenientes de estrellas binarias donde ambas son masivas o crearse de agujeros negros surgidos en regiones de alta densidad de estrellas.
- Los descubrimientos recientes de LIGO, de los cuales hablaremos más adelante. Han dado un nuevo impulso a esta teoría.

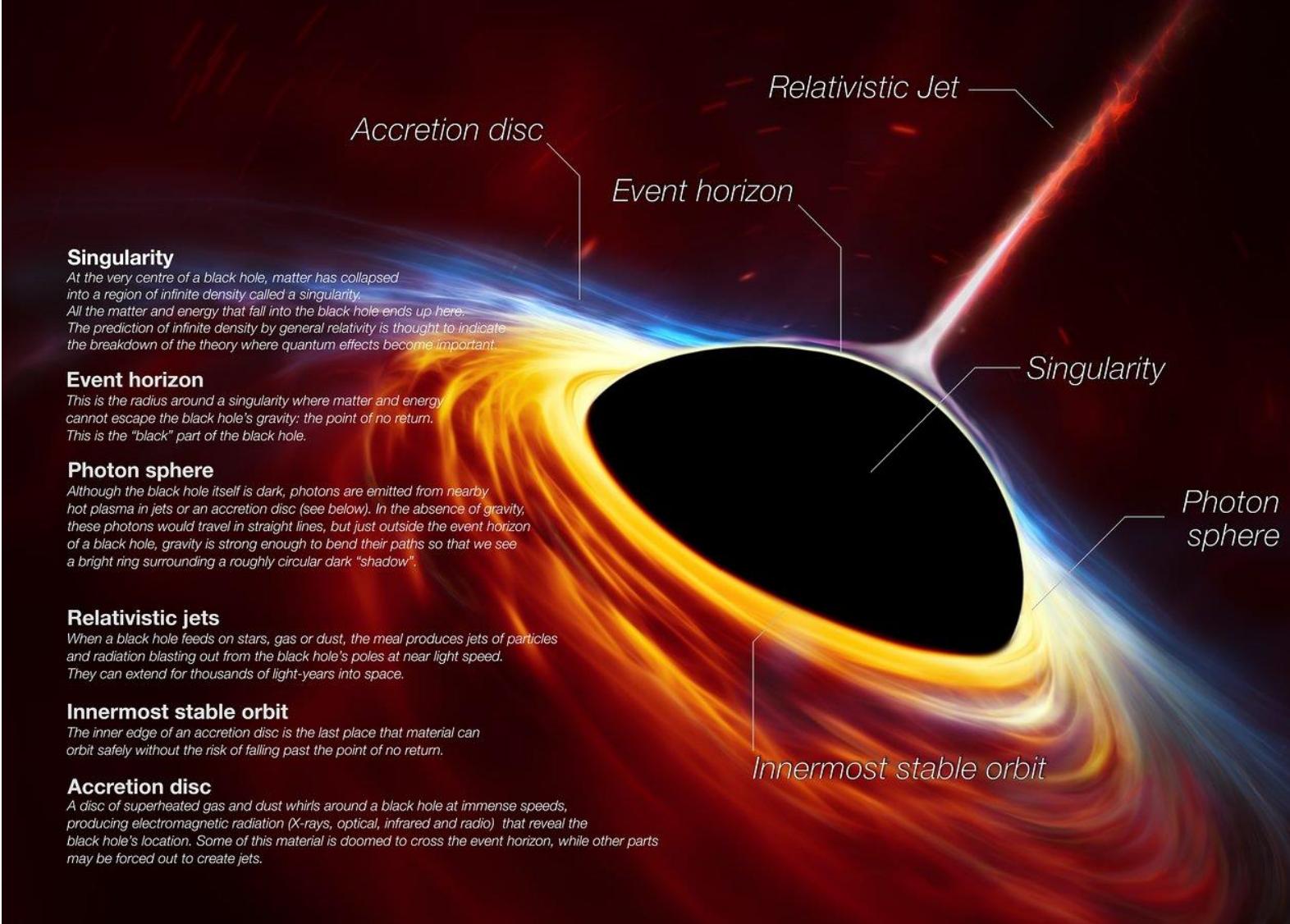


# Agujeros negros de todos los tamaños



La teoría general de la relatividad no impone un límite inferior en qué tan pequeños pueden ser los agujeros negros, sólo qué tan pequeña puede ser una estrella para formar un agujero negro. Existen otros mecanismos diferentes a los colapsos estelares para formar agujeros negros. Uno de ellos es la colisión de partículas con una gran cantidad de energía, como por ejemplo en el Gran Colisionador de Hadrones, en la frontera franco-suiza. Sin embargo, hasta la fecha, con las energías que se han logrado acelerar estas partículas, no se ha observado la creación de estos micro-monstruos. ¿Debemos temer la posible creación de uno? Al parecer no. Al ser tan pequeños, puede no ser tan fácil para ellos consumir materia pero por otro lado, de acuerdo a los descubrimientos de Stephen Hawking, creemos que los mismos se evaporarían.

# Anatomía de un agujero negro

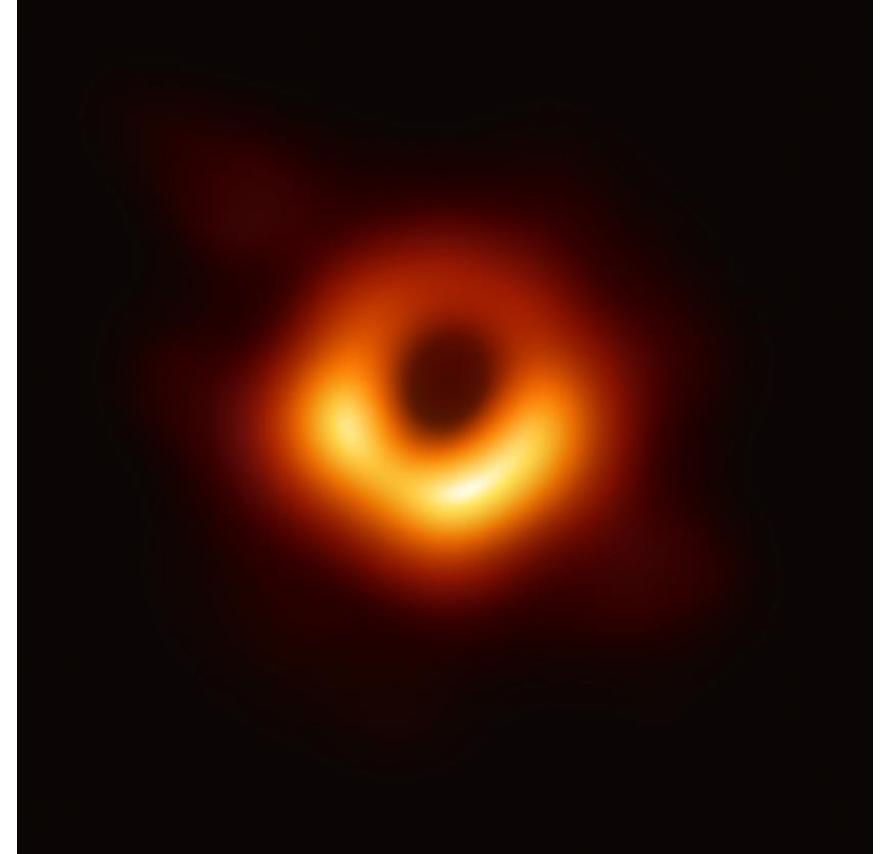


# El telescopio de horizonte de eventos

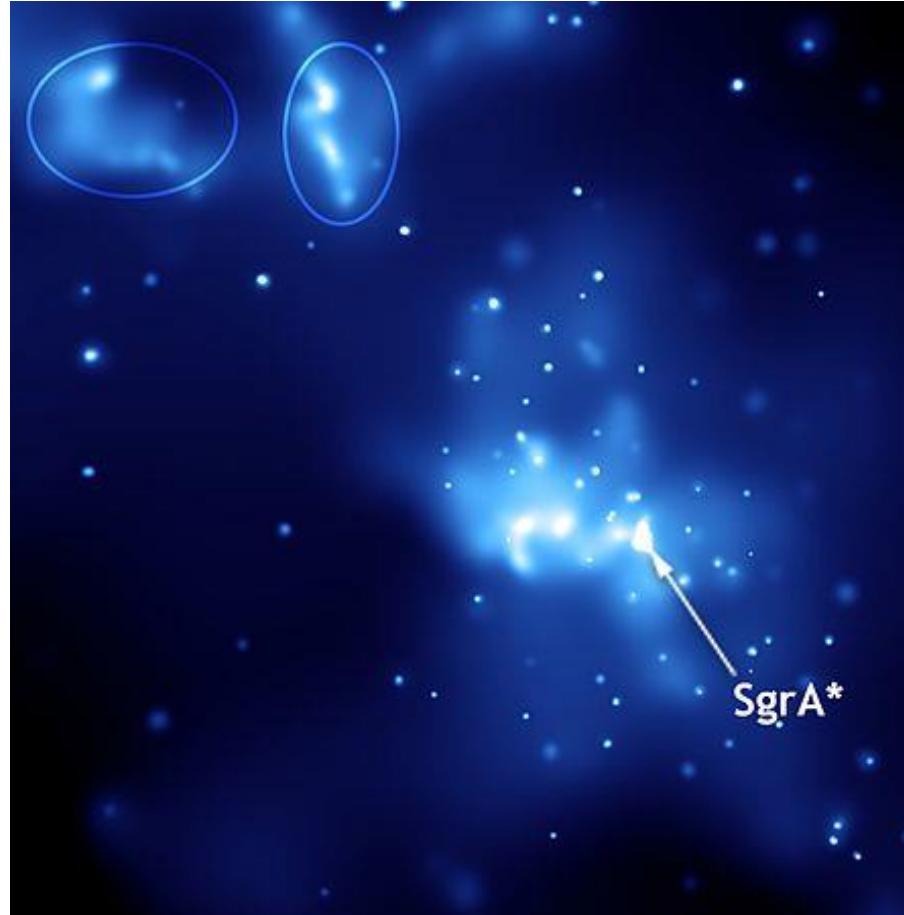


# La primera foto de un monstruo

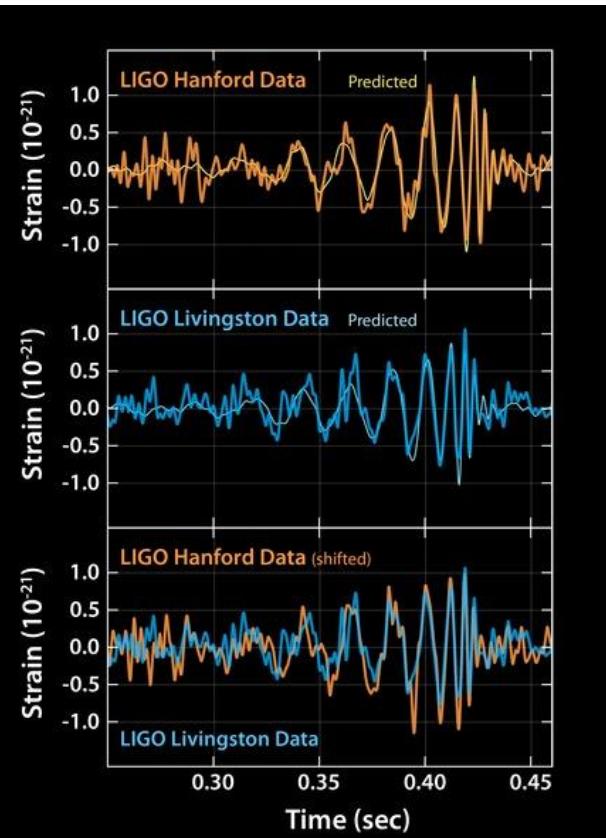
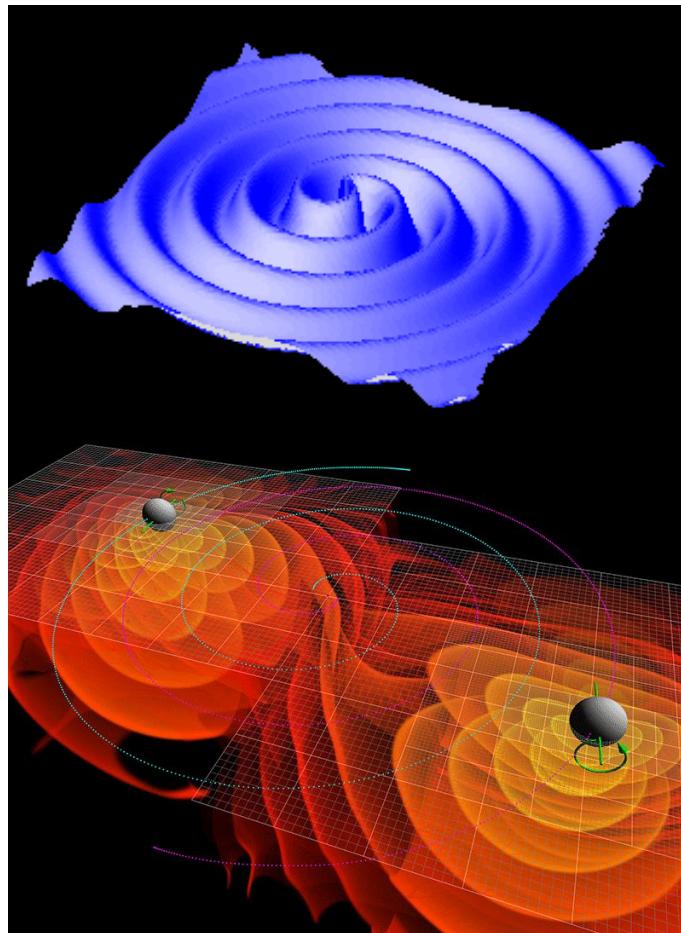
- El 10 de abril de 2019, se publicó la primera imagen del agujero negro dentro de la galaxia Messier 87 captada mediante este proyecto.
- El agujero negro supermasivo en el interior del núcleo de la galaxia elíptica súper-gigante Messier 87 en Virgo, tiene una masa de varios millardos de veces la del Sol, y se estima que es de unos  $7.22 (+0.34 -0.40) \times 10^9 M_{\odot}$ .
- Ha sido el primer agujero negro en ser fotografiado directamente por el Telescopio del Horizonte de Sucesos. El diámetro del anillo es de unas 700 UA, alrededor de diez veces más grande que la órbita de Neptuno alrededor del Sol. El diámetro aparente es de  $42 \pm 3$  microsegundos de arco.



# La deuda del telescopio de horizonte de evento.



# LIGO – Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory



La primera observación directa de ondas gravitacionales fue hecha el 14 de septiembre de 2015, y fue anunciada por la colaboración de los proyectos LIGO y Virgo en febrero 11, 2016. Previamente, las ondas gravitacionales sólo habían sido inferidas indirectamente, a través de sus efectos sobre la sincronización de los pulsares en sistemas binarios. La forma de la onda, detectada tanto por ambos observatorios LIGO, coincide con las predicciones de la relatividad general para ondas gravitacionales emanando desde una espiral hacia dentro y la fusión de un par de agujeros negros con alrededor de 36 y 29 masas solares, y el subsecuente resultado de un único agujero negro. La señal fue nombrada GW150914. También fue la primera observación de la fusión de un agujero negro binario, demostrando la existencia de sistemas binarios de agujeros negros estelares y del hecho que tales fusiones podrían ocurrir dentro de la actual edad del universo.

# LISA – Laser Interferometer Space Antenna

