

W. Luis Mochán Backal

Instituto de Ciencias Físicas, UNAM
Miembro de la ACMor

QUÉDATE QUIETO

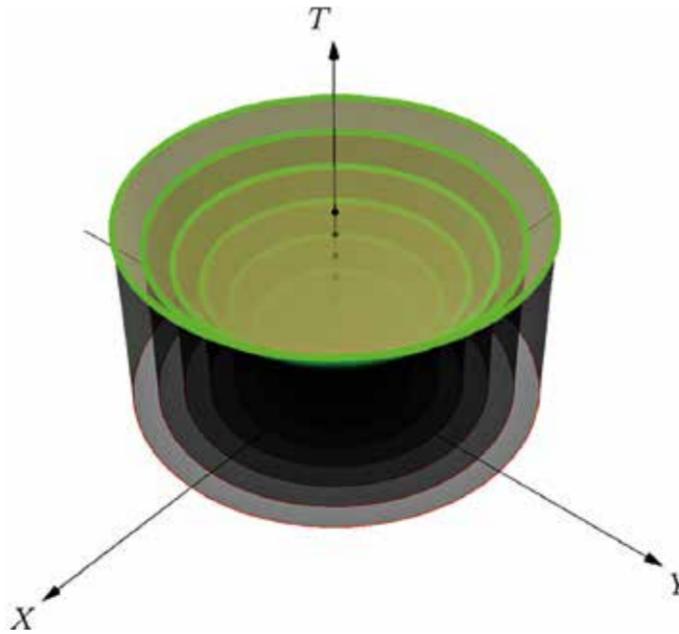
- Va un reto imposible.
- ¡No existen los imposibles, acepto el reto!
- Te reto a que te quedes quieto durante un segundo.
- ¡Trivial!, va: cero...uno, ¡listo! Aquí estoy y no moví ni una pestaña.
- Perdiste, te moviste y no un milímetro, un centímetro, ni un metro. Durante ese segundo te moviste trescientos mil kilómetros.
- ¡Cómo! No inventes, me quedé en la misma postura en la misma silla dentro de la misma casa, no me moví a ninguna parte. ¿Será que te refieres a que la Tierra giró sobre su eje, se desplazó alrededor del Sol y éste alrededor de la galaxia?
- No me refiero a la rotación ni translación de la Tierra ni al movimiento del Sol.
- ¿Entonces?
- Me refiero a que te moviste trescientos mil kilómetros en el *espacio-tiempo* durante un segundo, desde el pasado hacia el futuro, y nunca más repetirás dicho paseo. (Espero hagas muchos más).
- Me estás haciendo trampa. No me moví, simplemente pasó el tiempo, y el tiempo se mide en segundos, no en kilómetros.
- Eso es lo que se creía en la antigüedad, pero desde principios del Siglo XX sabemos que el tiempo y la distancia deben medirse con las mismas unidades, pues así la física se simplifica. Un segundo corresponde aproximadamente a 300,000 kilómetros (exactamente, a 299,792.458 km). Así, eso nos permite hacer geometría del espacio-tiempo y comparar mediciones realizadas por distintos *observadores*. Así como decir 10 pasos al norte puede significar algo distinto para quien se orienta con una brújula magnética que para quien se orienta con el eje de rotación de la Tierra, o con el sol matutino, un segundo para un observador puede significar un tiempo distinto que para otros observadores que pasen volando en naves espaciales, pero hay teoremas similares al teorema de *Pitágoras* que nos permiten comparar de manera objetiva las distancias entre dos eventos, sin importar quién los mida.
- Y ¿cuál es ese teorema?
- Imagina un triángulo en el espacio-tiempo formado por líneas rectas que unen mi posición actual, tu posición actual y tu posición dentro de un segundo (suponiendo que te quedas tan quieto como puedas). Esas líneas formarían un triángulo rectángulo en el cual la *diferencia* de los cuadrados de los catetos es igual al cuadrado de la hipotenusa.
- Dirás la *suma*.
- No, la *diferencia*, pues el espacio-tiempo se rige por la *métrica de Minkowsky*, no la de *Euclides*. Por lo mismo, la rapidez con que recorres el espacio-tiempo es $c=300,000$ km/s, ya sea que te quedes sentado o estés corriendo, vayas en un tren, en un avión o en una nave espacial. Tu velocidad en el espacio puede cambiar, pero tu rapidez en el espacio tiempo no cambia.

ESTOY ATRAPADO

- Como los cuadrados de los catetos son una cantidad *positiva*, y el cuadrado de la hipotenusa también, la velocidad con la que nos movemos en el *espacio* no puede superar la velocidad c , que es la misma que la velocidad de la luz. Por lo tanto, tú y yo estamos atrapados en nuestro *cono de luz futuro* del que jamás po-

drems salir.

- ¿Un cono en el espacio-tiempo?
- Sí. Imagina que prendes e inmediatamente después apagas un foco. Formarías así un pulso luminoso que se alejaría del foco, 300,000 km cada segundo en todas las direcciones. Así, dos segundos después, el destello ocupará una esfera de radio 600,000km. Tres segundos después, una esfera de 900,000km y así sucesivamente. Si apilas estas esferas en un diagrama de espacio tiempo verás que forman un cono. Te muestro una figura (Figura 1Error: Reference source not found).



▲ FIGURA 1. CONO de luz. Los círculos en el plano X-Y representan la posición ocupada por un pulso luminoso a distintos tiempos t . Los cilindros proyectan cada círculo hacia el plano $T=t$ donde T es el eje del tiempo. La unión de todos los círculos forma un cono, el cono de luz, del que nada escapa.

- Pero esa figura muestra círculos no esferas.
- Sí, pero es por mi incapacidad de dibujar figuras en las cuatro dimensiones del espacio-tiempo. Por eso, reduje una dimensión espacial y dibujé un cono formado de círculos y no un *hipercono* formado de esferas. Espero que igual puedas entender la analogía.
- ¿Y para qué te quieres escapar del cono?
- Si quisiera viajar a la estrella más cercana a la Tierra no podría llegar antes de cuatro años; no podría llegar antes de que la *línea de universo* de la estrella cruce mi cono de luz, aun empleando la tecnología más sofisticada que se pueda concebir, la cual no existe ahora, y cuando regrese a la Tierra todos mis amigos serán viejitos, si es que queda alguno. Además, si volteo a ver la información que me llega, toda está atrapada en mi cono de luz pasado. Los eventos fuera de mi cono de luz, ni los puedo afectar ni puedo llegar a ellos, ni me pueden afectar. El universo es grande, pero sólo podemos interactuar con una pequeña parte del mismo.

ESCAPE

- Ahora, toma una pelota y avientala hacia arriba. Ten cuidado de que no haya casas ni otras personas cerca. ¿Qué sucedería?
- Esto es fácil. La pelota subirá, disminuirá su velocidad hasta detenerse y empezará a caer hacia abajo donde podría atraparla.
- ¿Y sí la avientas con mayor velocidad?
- Pues simplemente, tardaría más en caer. Pero el hecho es que todo lo que sube, debe bajar, tarde o temprano.
- No, las cosas no son así. Si la aviento con una altísima velocidad, mayor que la *velocidad de escape* de la Tierra (y claro, la debo aventar desde más allá de la atmósfera para que no la frene la fricción con el aire) no regresaría.
- Y ¿qué es eso de la velocidad de escape?
- Seguramente recuerdas que una masa m en movimiento con velocidad v tiene una *energía*

Los Premios N

- cinética* $K=mv^2/2$, simplemente por moverse.
- Y una masa cerca de la superficie de la Tierra tiene una *energía potencial*, de acuerdo a su altura.
- Ya recuerdo, $V=mgz$, donde m es la masa, g la aceleración de la gravedad y z la altura respecto al suelo.
- Sí, pero esa fórmula es aproximada. La fórmula correcta es $V=-GMm/r$, donde G es la constante de la gravitación universal, que descubrió Newton, M la masa de la Tierra y r la distancia al centro de la Tierra. La energía total $K+V$ no cambia conforme un proyectil sube y baja en el vacío. Conforme la masa sube, V aumenta y K disminuye. Si K llega a cero, la masa dejaría de subir y empezaría a caer, pero si $K+V$ es positivo, K no se puede hacer cero y la masa no regresaría más a la Tierra. Se puede escapar.
- ¿Y qué velocidad es esa?
- En la superficie de la Tierra podemos despegar la velocidad v de igualar $mv^2/2-GMm/r=0$, y obtener $v=11,186m/s=40,370$ km/h. No parece ser nada lenta.

CURVATURA DEL ESPACIO TIEMPO

- El ejercicio realizado arriba usa conceptos de mecánica clásica como fuerza y energía. Sin embargo, la *Teoría General de la Relatividad* nos dice algo mucho más raro. Nos dice que la fuerza de gravedad *no existe*. En realidad, las masas, la energía y el ímpetu son las *fuentes* en unas ecuaciones de campo cuya solución nos proporciona la curvatura del espacio tiempo. Las ecuaciones de Einstein se ven muy simples, aunque son muy difíciles de resolver en general: $G_{\mu\nu}=8\pi T_{\mu\nu}/c^4$.
- ¿Cómo que el espacio-tiempo es curvo?
- Así es. Todas las partículas se mueven a lo

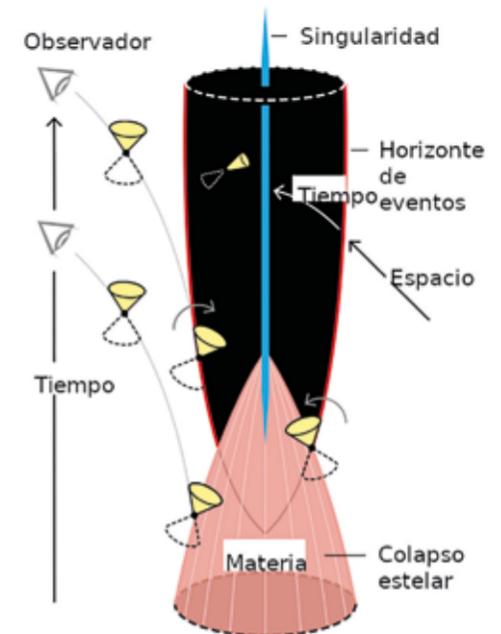


FIGURA 2. COLAPSO de una estrella masiva. Se muestra la materia que cae hacia el centro de la estrella debido a la atracción gravitacional entre sus partículas. La parte de abajo de la figura ilustra como los conos de luz se inclinan hacia el centro de la estrella. De manera que partículas moviéndose a lo largo de las trayectorias más rectas en esa geometría, le darían vuelta a la estrella como si existiera una fuerza gravitacional. Pero si el colapso continúa, llega un momento en que los conos de luz futuros quedan apuntando hacia el eje de la estrella. Es como si el futuro de una partícula que cae queda totalmente dentro del horizonte de eventos.

largo de las l
construir en
líneas se llam
tender la curv
to el cono de
en la misma
plano. Si uno
dirección y ot
curvo. En la
not found pu
cio-tiempo en
embargo, si la
atracción grav
zas que mant
más grande a
cleones, neut
tes, los quark
el colapso, sin
gularidad en
la física podr
conocemos. E
jero negro.

- Y este espec
- Podría ser q
acabado el co
nuiría la pres
campo gravit
después de ex
lo importante
luz alrededor
denotada com
estar tan incl
dicho horizon
la, y ni siquie
zonte de even
gravitacional
viesa dicho ho
universo. Una
relación entre
de un agujero
de escape sea
viajar más ráp

PREMIOS N

- Pero me dije
Nobel.
- Claro, y me
sulta que las l
ciles, pero son
go, un colega
obtuvo en 191
diente a un a
posiciones co
no tiene camp
Muchos física
que en situac
existir. Roger
1965 que los
que son estab
ridad en su in
sica son desco
Genzel (Figur
apuntaron los
rosos existen
galaxia, la Vi
una región n
scopios más
grande. Viene
centro de la g
rroja, i.e., má
conjunto de e
láctico (Figur
arrojadas si n
fuerza gravita
un agujero ne

Ligas de interés

1. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2020/s>
2. https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_radius
3. <https://www.gaceta.unam.mx/luis-felipe-rodriguez>

ESTA PUBLICACIÓN FUE REVISADA POR EL COMITÉ EDITORIAL DE LA ACADEMIA DE CIENCIAS DE MORELOS

Para actividades recientes de la academia y artículos anteriores puede consultar: www.acmor.org.mx
¿Comentarios y sugerencias?, ¿Preguntas sobre temas científicos? CONTÁCTANOS: editorial@acmor.org.mx

Nobel de Física 2020

líneas más rectas que se pueden en el espacio-tiempo curvo. Estas líneas se llaman *geodésicas*. Una forma de observar esto es observar en cada punto de luz. Si todos los conos apuntan en la misma dirección, el espacio-tiempo es plano. Si los conos están inclinados en una dirección u otra, el espacio tiempo es curvo. Figura Error: Reference source not found. Desde ver cómo se curva el espacio en la vecindad de una estrella. Sin embargo, si la estrella fuese tan grande que la fuerza gravitacional sea mayor que las fuerzas electromagnéticas, o entre los neutrones y protones, o entre sus pares y gluones, podría no detenerse hasta que se formara una *singularidad* en el centro, en la que las leyes de la física serían muy distintas de las que conocemos. En este caso, tendríamos un agu-

ntacular colapso, ¿a qué se debe? Esto ocurre cuando a una gran estrella se le haya agotado el combustible. Al enfriarse, disminuye la presión en su centro, y entonces su estructura gravitacional la haría colapsar, quizás convirtiéndose en una *supernova*. Pero esto depende de la masa de la estrella. Si es menor que la masa crítica, la región que rodea al *Horizonte de eventos*, pueden ser tan densos que sea imposible salir de allí. En ese caso, ninguna partícula, ni siquiera la luz podrían salir del horizonte de eventos. Salvo por las interacciones gravitacionales, es como si la materia que atravesó el horizonte desapareciera de nuestro universo. La forma aproximada de *estimar* la masa y el radio del horizonte de un agujero negro es pedir que la velocidad de escape sea igual a c , puesto que nada puede viajar más rápido que la luz.

NOBEL
¿Te gustaría que me contaras del premio Nobel? Este premio se distraje con muchos temas. Recordando las ecuaciones de Einstein se ven fáciles de resolver. Sin embargo, Einstein, Karl Schwarzschild, no dieron una solución exacta correspondiente a un agujero negro, pero haciendo supuestos como que el agujero negro no rota, no tiene campo magnético, y que es isotrópico. Sin embargo, los físicos, incluyendo Einstein, creían en soluciones más realistas, no podrían haber sido descubiertas. Penrose (Figura 3) demostró que los agujeros negros sí pueden existir, que esconden una singularidad en la que las leyes de la física no son válidas. Por otro lado, Reinhard Genzel (Figura 4) y Andrea Ghez (Figura 5) usaron telescopios más grandes y poderosos para ver el centro de nuestra galaxia *Vía Láctea*. Curiosamente para ver el centro más pequeño se requieren telescopios más grandes que para ver una región más grande. Así es como a través del polvo que rodea el centro de la galaxia usando para ello *luz infrarroja* que el rojo, encontraron un agujero negro que orbita al núcleo galáctico (Figura 6), tan rápidamente que serían imposibles de ver fuera porque hay una enorme cantidad de polvo, debida a la presencia de un agujero negro *supermasivo*.



FIGURA 3. BOCETO de Roger Penrose, ganador del premio nobel de física 2020 por mostrar la existencia y estabilidad de agujeros negros.



FIGURA 4. BOCETO de Reinhard Genzel, ganador del premio nobel de física 2020 por su observación de un agujero negro supermasivo en el núcleo de nuestra galaxia.



FIGURA 5. BOCETO de Andrea Ghez, ganadora del premio nobel de física 2020 por su observación de un agujero negro supermasivo en el núcleo de nuestra galaxia.

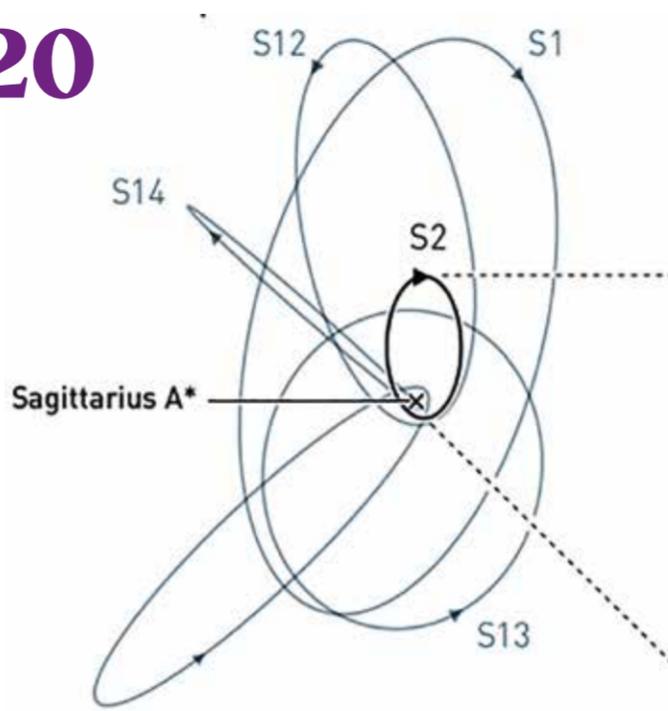


FIGURA 6. ÓRBITA de algunas estrellas que circulan alrededor de un agujero negro supermasivo en el núcleo de nuestra galaxia.

- Y ¿qué tan masivo es *supermasivo*?
- El agujero negro en el centro de nuestra galaxia tiene la misma masa que tendrían cuatro millones de soles.
- Algo leí de un resultado previo de un mexicano.
- Así es, en el año 1979 un investigador de la UNAM, el astrónomo *Luis Felipe Rodríguez* hizo observaciones empleando ondas de radio y predijo que debería haber una masa de alrededor de cinco millones de soles en el núcleo de nuestra galaxia, muy cercano al valor ahora reconocido.
- También me parece recordar que ya había leído algo al respecto de una imagen de alta resolución tomada a un agujero negro.
- Así es, fue publicado en la columna "La Ciencia, desde Morelos para el Mundo"



donde se mencionaron los logros más importantes del 2019 (<http://www.acmor.org/articulo/los-logros-mas-importantes-en-ciencia-y-tecnologia-del-2019>). De hecho, las fotografías (Figura 7) fueron obtenidas por una red mundial de telescopios en la cual participó México con el Gran Telescopio Milimétrico "Alfonso Serrano" ubicado en el pico de Orizaba.

Esta columna se prepara y edita semana con semana, en conjunto con investigadores morelenses convencidos del valor del conocimiento científico para el desarrollo social y económico de Morelos. Desde la Academia de Ciencias de Morelos externamos nuestra preocupación por el vacío que genera la extinción de la Secretaría de Innovación, Ciencia y Tecnología dentro del ecosistema de innovación estatal que se debilita sin la participación del Gobierno del Estado.

Agradecimientos
Este trabajo recibió apoyo parcial del proyecto DGAPA-UNAM IN111119.

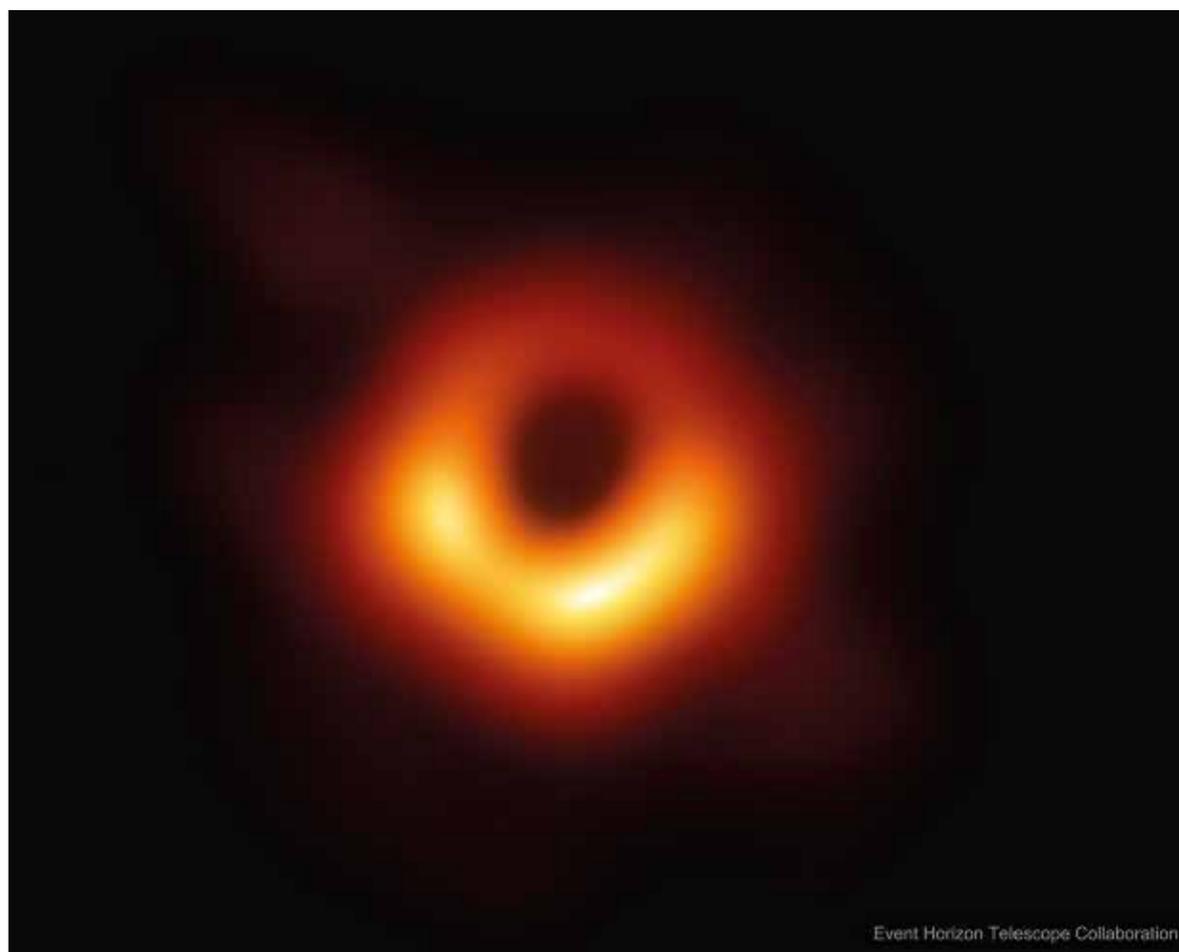


FIGURA 7. IMAGEN integrada del agujero negro en el centro de la galaxia M87. Tomada de <https://apod.nasa.gov/apod/ap190411.html>