

# EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO: ¿QUÉ ES Y CÓMO LO ILUMINAMOS?

Agujeros negros, materia oscura y energía oscura son quizás los misterios más atractivos de la gravitación actual. Para develarlos, es necesario descubrir una nueva teoría de gravedad.

• *Cristián Erices*  
Dr. en Ciencias Físicas

Descubrir cómo funciona la naturaleza, nos ha permitido sobrevivir y ha mejorado nuestra vida notablemente, incluso desde los tiempos en que nuestra capacidad cognitiva como especie era apenas suficiente para razonar como lo hacemos ahora. Sin embargo, tan solo el ejercicio de entender nuestro universo es un acto en sí mismo hermoso, que a veces tiene efectos prácticos; pero tal característica no constituye su principal importancia en absoluto. Pensemos tan sólo cómo sería el mundo actual, si nuestros antepasados hubieran desistido de jugar con ruedas porque quizás no tenían un sentido práctico en su momento. Las aplicaciones prácticas, son más bien una consecuencia derivada de su finalidad primigenia: la búsqueda de la verdad y el entendimiento objetivo de la naturaleza a través de nuestra razón. Es en esta "empresa" donde se desarrolla la física teórica y en particular, la gravitación y la cosmología, ambas disciplinas base para el desarrollo de nuestras investigaciones en el grupo de física teórica de la universidad. Nuestro objetivo es entonces bastante ambicioso; intentar develar dos de los misterios más fascinantes de la naturaleza: ¿Cuáles son esos misterios y qué hacemos para iluminar la descripción teórica de este lado oscuro del universo?

Cuando miramos al cielo, por ejemplo, todas las estrellas y halos que podemos ver representan un 0.5% del universo. Todo lo que vemos, los átomos que componen desde las estrellas hasta nuestros cuerpos, la luz, toda radiación electromagnética, incluso las partículas detectadas en sofisticados laboratorios y aceleradores de

partículas, todo esto representa solo el 5% del contenido energético del universo. Como si existiera un telón de fondo que esconde celosamente lo que ocurre detrás del escenario, físicos y astrónomos hemos aceptado con resignación que solamente el 95% del contenido del universo lo constituye algo muy distinto de lo que observamos normalmente.

Los primeros indicios de materia oscura se remontan a 1933, cuando se descubrió un movimiento anómalo de un cúmulo de galaxias. Estos son enjambres de galaxias que se mantienen unidas por la fuerza gravitacional, girando unas en torno a las otras. Los astrónomos pueden inferir la masa de estos cúmulos midiendo las velocidades con que se mueven las galaxias individuales y las distancias que las separan. Cuando se realiza tal deducción, se puede concluir que la masa del cúmulo de galaxias es muchísimo mayor que la resultante de todas sus estrellas. Hay un tipo de materia entonces, que está presente en mucha mayor densidad que la luminosa por lo que recibió el nombre de "materia oscura". Se estima que hay un 26% de materia oscura en nuestro universo [1].

En 1998 observaciones astronómicas de supernovas tipo Ia en diversas galaxias mostraron que el universo se está expandiendo aceleradamente [2,3]. Se trata de la explosión de un tipo especial de estrellas llamadas enanas blancas, pesadas como el Sol pero pequeñas como la Tierra. Debido a la atracción gravitacional que genera en sus vecindades, esta puede robar materia a otra estrella y engordar

hasta colapsar, provocando una explosión de tal intensidad que su brillo es comparable con el de una galaxia entera. Estas explosiones son ideales para la determinación precisa de distancias a galaxias lejanas, y permitió a dos grupos de astrónomos calcular cómo cambia la velocidad de expansión del universo. Trece años más tarde, este descubrimiento los hizo merecedores del premio Nobel, no solo por haber comprobado que el universo se expande, sino que también por demostrar que lo hace aceleradamente. Desde entonces, este extraño comportamiento del universo ha sido confirmado por una plétora de observaciones de naturaleza completamente distinta, por lo que solo queda aceptarlo e intentar esclarecerlo. Pues bien, lo que sí es claro es que una extraña forma de energía es responsable de este fenómeno. En alusión a este carácter de mano invisible que empuja a las ga-

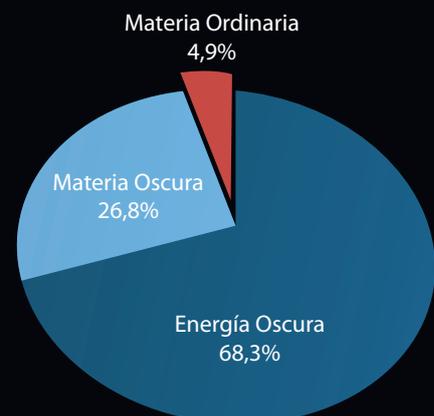


Figura 1

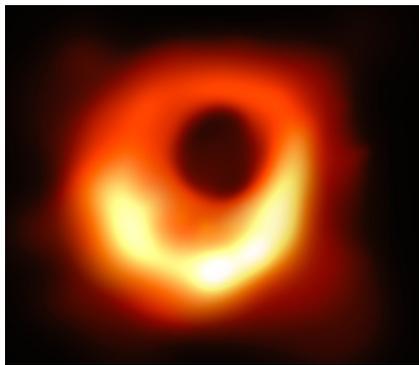
Contenido del universo

laxias en dirección contraria a la esperada, se la llama “energía oscura”. Se estima que hay un 68,3% de energía oscura en nuestro universo [1].

Un agujero negro en cambio, es una región del espacio acotada donde la gravedad es tan fuerte que ni siquiera la luz puede escapar. Esta región en torno a este objeto se conoce como “horizonte de eventos”. Una superficie, que una vez que se cruza, no hay vuelta atrás. Nada puede salir. Nada puede traspasarlo para volver a contarnos su experiencia. Todo lo que lo traspase está condenado a caer hacia el centro, un punto donde toda la materia que ha caído se acumula en un volumen de dimensiones ínfimas: la singularidad. Allí se acaba todo, incluso el tiempo y las leyes de la física dejan de ser válidas. Es una de las falencias, que la misma teoría de la relatividad general (en adelante “RG”) de Albert Einstein predice sobre sí misma. Sin embargo, suena tan descabellado, que el mismo Einstein, pensaba que su existencia era absurda. Una estrella jamás podría concentrar tanta materia. La Tierra, por ejemplo, debe comprimirse como un grano de uva para transformarse en un agujero negro. Esto es imposible que ocurra en nuestra “tranquila” vida de nuestro planeta, sin embargo, el universo lo hace por nosotros. Algunas estrellas mueren cuando se les acaba el combustible termonuclear que queman en su centro y cuando eso ocurre, comienzan a comprimirse naturalmente, por efecto de la gravedad de sus constituyentes, y pueden convertirse en un agujero negro. Roger Penrose, fue el primero en demostrar matemáticamente en 1965, a través de un hermoso teorema que lleva su nombre, que los agujeros negros son una consecuencia natural de la teoría de la RG [4]. Más aun, agujeros negros supermasivos (millones de veces más masivos que el sol) parecen habitar el centro de muchas galaxias. Reinhard Genzel y Andrea Ghez, observaron por alrededor de 30 años, las órbitas que describían las estrellas en el centro de nuestra galaxia, las cuales exhiben las características que la RG de Einstein predice. Dichas observaciones permitieron deducir que, en el centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea, existe una región que contiene un objeto extremadamente pesado, bautizada Sagitario A\*, cuya masa es alrededor de 4 millones la masa de nuestro sol [5]. Un agujero negro supermasivo es la única explicación actual para esto. Dichas investigaciones le valieron el premio Nobel a Penrose, Genzel y Ghez en el año 2020.

Observaciones como la reciente detección simultánea de ondas gravitacionales y rayos gamma [6,7,8], provenientes del colapso de un sistema de dos estrellas de neutrones que confirmó su propagación lumínica, junto con la primera imagen de

la “sombra” de un agujero negro supermasivo en la galaxia M87 presentada por la colaboración internacional del Telescopio Event Horizon [9,10], han reafirmado a la RG como la teoría más exitosa que describe a la interacción gravitacional por alrededor de cien años [11,12].



**Figura 2**

*Esta es la imagen de un agujero negro supermasivo en el centro de la galaxia M87, a 53 millones de años luz de distancia de nuestra galaxia. Las manchas rojas corresponden a gas muy caliente moviéndose alrededor del agujero negro.*

En su concepción original en cuatro dimensiones (las tres espaciales que conocemos más el tiempo), la RG ha demostrado ser una teoría clásica de gravedad cuyas predicciones tienen una sorprendente concordancia con experimentos en rangos de escala de distancia desde micrones (como el tamaño de una bacteria) hasta unidades astronómicas (distancias comparables como la que hay entre la Tierra y el Sol). Sin embargo, a pesar del gran éxito de esta teoría, aún existen ciertas interrogantes que la RG no puede responder. Por ejemplo, la expansión acelerada del universo no puede ser explicada satisfactoriamente por la RG, ni tampoco la velocidad de rotación de estrellas alejadas del centro de la galaxia parece concordar con las predicciones de la RG. Ambos fenómenos son atribuibles a la energía y materia oscura, respectivamente, constituyendo un problema a resolver en escalas de distancia muy grandes (cosmológicas y galácticas). Por otro lado, tampoco puede responder qué pasa durante “el inicio del universo” ni tampoco es válida en la singularidad de un agujero negro. Esto sería un problema a resolver relacionado con escalas de tiempo y distancia muy pequeñas (a nivel cuántico).

Antes de la RG, existía la teoría de Newton que no podía explicar ciertos fenómenos como la órbita de Mercurio, pero sí explicaba muy bien cómo se movían el resto de los planetas del sistema solar. Pues bien, cuando apareció la RG, el misterio de la órbita de Mercurio fue resuelto, y ambas teorías concuerdan perfectamente para el resto del movimiento planetario. Es decir, RG contiene a la teoría de Newton y tiene un poder predictivo que abarca un espectro mayor de las escalas de distancia. De

igual manera, actualmente necesitamos una teoría que contenga a RG, pero con un poder predictivo en un espectro más amplio de escalas de distancia: donde las singularidades puedan ser explicadas y además donde la materia y energía oscuras puedan ser descritas. Una teoría completa de gravedad se ha convertido en el santo grial de la física teórica, y en particular una de las obsesiones de la gravitación.

Para poder dar respuesta o al menos adquirir un acercamiento a alguna característica subyacente de una teoría mayor que responda a todas estas preguntas, es que el primer intento para alcanzar este objetivo es modificar la RG [13]. Poco después de la formulación de RG se desarrollaron las primeras teorías modificadas y aún se siguen elaborando teorías con el fin de resolver estos problemas. Actualmente existe una fauna increíble de distintos tipos de teorías modificadas, muchas de ellas apuntando a una descripción de la expansión acelerada del universo consistente con las observaciones, además de describir la interacción gravitacional a nivel cuántico. Si bien varias de ellas pueden describir muy bien estos fenómenos, pagan el costo de tener alguna patología física, ya sea violando algún principio o simetría física que los puristas más conservadores desapruaban, siendo excesivamente exóticas o complicando de sobremanera las modificaciones en claro desacuerdo con los seguidores del principio de parsimonia. Hay teorías incluso que proponen la existencia de múltiples universos. El arte de modificar la RG siguiendo los principios físicos y simetrías inherentes de la naturaleza está más activo que nunca. Su motivación: iluminar el lado oscuro del universo.

## Referencias

- [1] P.A.R. Ade et al. (Planck Collaboration), Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters, *Astron. Astrophys.* 594, A13 (2016).
- [2] Riess A G et al, *Astron. J.* 116, 1009 (1998).
- [3] Perlmutter S et al, *Astrophys. J.* 517, 565 (1999).
- [4] R. Penrose, *Phys. Rev. Lett.* 14, 57 (1865).
- [5] R. Genzel et al. *A&A* 615, L15 (2018).
- [6] B. P. Abbott et al. (Virgo, LIGO Scientific), *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016).
- [7] B. P. Abbott et al. (Virgo, LIGO Scientific), *Phys. Rev. Lett.* 119, 161101 (2017).
- [8] B. P. Abbott et al. (Virgo, Fermi-GBM, INTEGRAL, LIGO Scientific), *Astrophys. J.* 848, L13 (2017).
- [9] K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope), *Astrophys. J.* 875, L1 (2019).
- [10] K. Akiyama et al. (Event Horizon Telescope), *Astrophys. J.* 875, L6 (2019).
- [11] C. M. Will, *Living Rev. Rel.* 9, 3 (2006).
- [12] A. Hees et al., *Phys. Rev. Lett.* 118, 211101 (2017).
- [13] Clifton et al, *Phys. Rep.* 513, 1 (2012).