



Física

¿La manzana es cúbica?: Reflexiones acerca de las teorías de la gravedad

Is the apple cubic? Reflections about gravity theories

Yeinzon Rodríguez

Centro de Investigaciones en Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Antonio Nariño,

“

Palabras clave:

Gravedad de Newton, Gravedad de Einstein, Gravedad modificada.

Keywords:

Gravity, Newton, Einstein, Modify gravity.

”

Su estado de profunda reflexión se vio súbitamente interrumpido cuando una manzana cayó del árbol

Resumen

Con respecto a la descripción de la gravedad, la formación secundaria en Colombia, y en muchos otros países no llega más allá de la ley de gravitación universal de Newton, en la mayoría de ocasiones complementada con la historia de Newton y la manzana cayendo. Un segmento de esta población conoce, adicionalmente, que la teoría de la gravitación más aceptada actualmente es la relatividad general de Einstein, la cual generaliza la ley de gravitación universal. Es usual, por lo tanto, que la mayoría de personas sin una formación profesional en Física asocien la ley de gravitación universal, y por extensión la relatividad general, con la manzana cayendo. Explotando esta asociación, se discute en este artículo si la manzana podría ser cúbica, es decir, si existe alguna descripción de la fuerza gravitacional que generalice a la de Einstein y que sea bien motivada y consistente con las mediciones más recientes.

Abstract

Regarding the gravity description, the high school education in Colombia, and in many other countries, does not go beyond the Newton's universal gravitation law, in most of the cases complemented with the story of Newton and the falling apple. One segment of this population know, additionally, that the most accepted gravity theory nowadays is Einstein's general relativity, which generalizes the universal gravitation law. It is usual, therefore, that most of the people without a professional education in Physics associate the gravitation universal law, and as an extension general relativity, with the falling apple. Exploiting this association, this article discusses whether the apple might be cubic, i.e., whether there exists some description of the gravitational force that generalizes Einstein's and that is well motivated and consistent with the most recent measurements.

Introducción

Durante una estadía en la casa de su madre en Lincolnshire, Isaac Newton se encontraba sentado bajo un árbol de manzano reflexionando acerca de las fuerzas que daban lugar al movimiento de los cuerpos celestes. Su estado de profunda reflexión se vio súbitamente interrumpido cuando una manzana cayó del árbol, lo cual brindó a la creativa mente de Newton el impulso necesario para llegar a una de sus más importantes intuiciones: la fuerza que mantenía a los cuerpos celestes en movimiento era la misma que hacía que la manzana, y todos los demás cuerpos sobre la tierra, cayeran al suelo (véase las imágenes. 1 y 2). Cerca de tres siglos después, Albert Einstein tomaba muy en serio la observación de que todos los cuerpos caían de la misma forma, sin importar cuál era su masa (Imagen 3). Tal observación le permitió intuir que la fuerza gravitacional no era algo que

dependiera del cuerpo que la experimentaba sino una característica propia del espacio y el tiempo en que éste se ubicaba. No hubo una manzana en la historia de Einstein pero sí una mente brillante que lo llevó a descubrir la teoría que mejor describe, hasta ahora, la fuerza gravitacional.

En muchos países del mundo, dentro de los que se incluye Colombia, la formación en física durante la secundaria apenas describe el hallazgo de Newton en lo que se conoce como la ley de gravitación universal. La historia de la manzana cayendo ha acompañado tradicionalmente tanto a esta descripción como a la idea general de lo que es la fuerza gravitacional. Es por esta razón que aquellas personas que conocen, adicionalmente, que la teoría general de la relatividad desarrollada por Einstein es, ante todo, una descripción de la fuerza gravitacional, consideren a la manzana como un elemento romántico y subyacente del trabajo de Einstein. Durante más de cien años, la teoría general de la relatividad de Einstein ha demostrado ser consistente con todas las observaciones disponibles. Por lo tanto, su reinado, cuyo escudo de armas es una manzana, parece no estar en riesgo. ¿Sin embargo, existe alguna descripción alternativa de la fuerza gravitacional que rivalice con la teoría de Einstein? ¿Puede una teoría alternativa destronar la relatividad general y cambiar el escudo de armas a una extraña manzana, una manzana que sea cúbica?

El propósito de este artículo es dar respuesta a estas preguntas mediante una breve descripción y reflexión acerca de las teorías gravitacionales de Newton y de Einstein, así como de las teorías actuales y bien motivadas que se encuentran bajo intenso estudio y que se denotan, de forma genérica, como teorías modificadas de la gravedad.

Isaac Newton y la manzana cayendo

Isaac Newton es considerado como uno de los más grandes científicos de toda la historia de la humanidad. Fue un caballero británico que, entre sus logros más notables, creó el área de las Matemáticas conocida hoy en día como Análisis o Cálculo y postuló sus famosas tres leyes de la mecánica, leyes que describen de una manera correcta y precisa el movimiento de todos los cuerpos y que, a la postre, han sido responsables de todos los desarrollos tecnológicos en los últimos trescientos años (Newton, 1687). También es bien conocido por su ley de gravitación universal, ley que le permitió probar formalmente que las trayectorias de los cuerpos celestes en órbita alrededor del Sol correspondían con las formas geométricas conocidas como cónicas: círculo, elipse, parábola, e hipérbola,

En muchos países del mundo, dentro de los que se incluye Colombia, la formación en Física durante la secundaria apenas describe el hallazgo de Newton

proporcionando una simple y acertada explicación a los curiosos movimientos de estos cuerpos en el cielo (Newton, 1687). Se dice que, gracias a una manzana que cayó frente a él cuando éste se encontraba reflexionando bajo un árbol de manzano, Newton logró asociar la fuerza que mantenía a los cuerpos celestes en órbita con aquella que hacía que todos los cuerpos cayeran al suelo (Imágenes 1 y 2). Tal asociación le permitió postular su ley de gravitación universal y el consecuente éxito en la descripción de los movimientos celestes.



Figura 1. Árbol de manzano cercano a la casa materna de Isaac Newton (la que se ve en el fondo). Se cree que de este árbol cayó la manzana que inspiró la ley de gravitación universal de Newton.



Figura 2. Imagen de Isaac Newton en el momento cumbre de la historia de la manzana cayendo.

¿En qué consiste, sin embargo, la ley gravitacional de Newton? ¿Da cuenta esta, realmente, del porqué de esta curiosa interacción? La verdad es que, aun cuando extremadamente exitosa en su descripción de los efectos gravitacionales, esta ley no proporciona razón alguna sobre el origen de este tipo de fuerza, sobre las razones por las cuales la naturaleza escogió este tipo de interacción. De hecho, la ley permite concluir que un cuerpo experimenta de forma inmediata la presencia de otro y sus efectos gravitacionales, lo que implica una rapidez infinita en la transmisión de la información, algo que es concebido hoy en día como un absurdo.

Los restos de uno de los más grandes científicos de la historia reposan hoy en la Abadía de Westminster en Londres; en su honor, una estatua se erigió en el Museo de Historia Natural de la Universidad de Oxford en donde él se observa mirando detenidamente una manzana a sus pies (Imagen 4), mientras que en el Trinity College de la Universidad de Cambridge crece un árbol de manzano bajo el cuarto en el que él vivió y estudió (Imagen 5), todo ello como recuerdo y símbolo de su inmenso aporte en la comprensión de los fenómenos naturales.



Figura 4. Estatua en honor a Isaac Newton, con la manzana a sus pies, en el Museo de Historia Natural de la Universidad de Oxford.

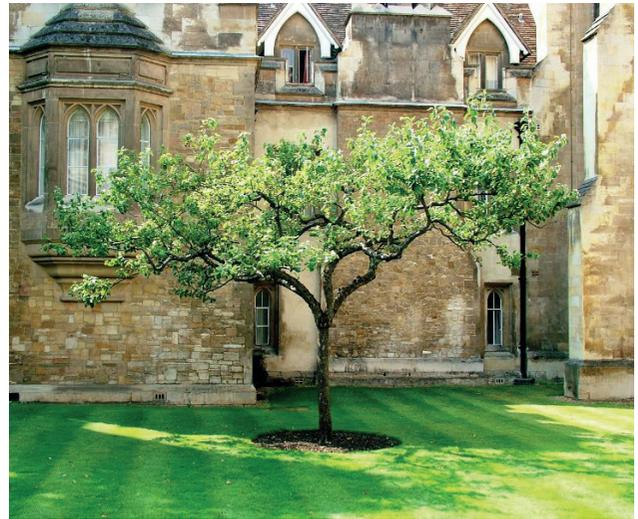


Figura 5. El árbol de manzano plantado en el Trinity College de la Universidad de Cambridge, bajo el cuarto en el cual vivió y estudió Isaac Newton.

Albert Einstein y la naturaleza del espacio y el tiempo

Albert Einstein comparte con Isaac Newton el calificativo de uno de los más grandes científicos de la historia de la humanidad (Imagen 6). Siendo un Judío Alemán, evadió el trágico destino de su raza durante la segunda guerra mundial habiendo ya realizado varios aportes a la Física muy notables y merecedores cada uno de ellos, según el concepto de muchos científicos actuales, de un premio Nobel de Física. Su desarrollo más notable, la teoría de la relatividad general (Einstein, 1915-1916), se construye enteramente a partir del llamado principio de equivalencia (Ver Imagen 3), el cual formaliza su brillante observación sobre la respuesta idéntica de todos los cuerpos a una fuerza gravitacional como la manifestación de que la naturaleza de esta fuerza reside en las propiedades intrínsecas del espacio y el tiempo.

Explotando esta asociación, se discute en este artículo si la manzana podría ser cúbica



Figura 3. Ilustración del principio de equivalencia. Dos esferas de diferente masa y tamaño son lanzadas desde lo más alto de la torre inclinada de Pisa. Las dos esferas caen al mismo ritmo y golpean el piso simultáneamente.



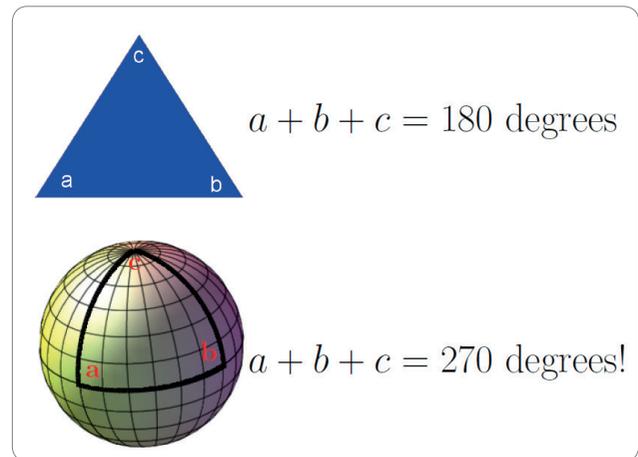
Figura 6. Albert Einstein alrededor de 1905, año en que publicó varios de sus trabajos más notables, entre ellos su teoría especial de la relatividad.

A diferencia de Newton, quien consideraba al espacio y al tiempo como entes rígidos, absolutos, y, en el caso del tiempo, con un fluir constante (Newton, 1687), Einstein reconoce que este par de entes no son absolutos, es decir, que las medidas de distancias e intervalos de tiempo para un mismo proceso físico son, en general, diferentes para diferentes observadores (Einstein, 1905). Por lo tanto, el concepto de simultaneidad de un par de eventos ya no es algo absoluto sino relativo e, incluso, puede no llegar a existir. Esta última situación presentarse cuando dicho ente único, llamado ahora espacio-tiempo, posee curvatura.

El concepto de curvatura es fácil de entender si se recuerda las viejas clases de geometría en la educación primaria y/o secundaria: dos rectas paralelas nunca se cortan, la suma de los ángulos internos de un triángulo es siempre 180° , por un par de puntos cruza una y sólo una recta, etc.; todo este conjunto de conocimiento se denomina geometría euclidiana, gracias al griego Euclides quien, en su obra *Los elementos*, reunía todo el conocimiento de su época sobre esta materia dándole, a su vez, un marco de formalidad propia de los actuales matemáticos. También es importante recordar a Pitágoras y su famoso teorema: el cuadrado del lado más largo de un triángulo rectángulo es igual a la suma de los cuadrados de los dos lados más pequeños. El espacio cuyas propiedades geométricas vienen descritas por la geometría euclidiana y por el teorema de Pitágoras se denomina espacio Euclídeo o simplemente espacio plano o con curvatura cero. En contraste, aquel espacio en el que no aplica la geometría euclidiana ni el teorema de Pitágoras, por ejemplo, cuando la suma de los ángulos internos de un triángulo rectángulo no es 180° o cuando dos rectas paralelas eventualmente se cruzan, se dice que es

curvo (Imagen 7). Puede parecerle extraño a cualquier persona que pueda existir un espacio que no cumpla aquellas propiedades enseñadas en el colegio y/o la escuela, es decir, las propiedades de la geometría euclidiana, pero dichos espacios, aun cuando puedan ser abstractos, existen en la formalidad de las matemáticas y, curiosamente, explican de manera más acertada el comportamiento del mundo.

Figura 7: En un espacio plano, la suma de los ángulos internos de cualquier triángulo es 180° . En un espacio curvo, esta suma es, en general, diferente.



Con Einstein, los conceptos de espacio y tiempo se transforman, fundiéndose en un único ente llamado espacio-tiempo, el cual puede ser curvo. El cambio de paradigma en la forma de pensar acerca del espacio y el tiempo constituyó el desarrollo principal de lo que se denomina la teoría especial de la relatividad (Einstein, 1905), en tanto que la posibilidad de una curvatura del espacio-tiempo y su estrecha relación con la gravedad fueron el tema central de lo que se denomina la teoría general de la relatividad (Einstein, 1915-1916). Al considerar seriamente la observación de que todos los cuerpos, sin importar su masa, caían al mismo ritmo desde una misma altura, Einstein intuyó que el movimiento de caída de los objetos estaba determinado por las propiedades geométricas del espacio-tiempo mas no por las propiedades de los objetos en sí mismos. Esto lo llevó a considerar que la fuerza de la gravedad no es en realidad una fuerza, no es el producto de la interacción entre un par de cuerpos, sino que es simplemente la manifestación de un cuerpo que sigue una trayectoria recta, como lo establece la segunda ley de Newton: el cuerpo se moverá siguiendo una línea recta a velocidad constante si no existe una fuerza neta aplicada sobre el mismo (Newton, 1687), trayectoria que se debe entender en el contexto de un espacio curvo y que, por lo tanto, no luce como las líneas rectas de la geometría euclidiana; la trayectoria circular, elíptica, parabólica o hiperbólica que podría tener una manzana en órbita alrededor del Sol, descrita de manera precisa por la ley de gravitación universal de Newton, no es más que una trayectoria recta en un espacio-tiempo curvo: la manzana cayendo libremente en la línea recta del espacio-tiempo curvo, evocando a la manzana cayendo libremente del árbol de manzano en Lincolnshire siguiendo la línea recta del espacio euclidiano. Einstein, a su vez, nos enseña que el origen de esta curvatura es la presencia de los cuerpos, aquellos con mayor masa

generando mayor curvatura, el ejemplo típico siendo el Sol generando la curvatura que da carácter de líneas rectas en el espacio-tiempo curvo a las trayectorias circulares, elípticas, parabólicas o hiperbólicas de la geometría euclidiana.

La teoría general de la relatividad de Einstein se ha convertido en la mejor teoría de la gravedad de la cual disponemos, dando cuenta de variados fenómenos debidamente observados y estudiados como el movimiento anómalo de Mercurio alrededor del sol (Weinberg, 1972), la existencia y propagación de ondas gravitacionales –patrones de oscilación del espacio-tiempo que transmiten con una rapidez finita la información gravitacional– (Abbot *et al.*, 2016), y la existencia de agujeros negros: regiones del universo muy masivas en donde la fuerza gravitacional es tan fuerte que ni la luz puede escapar (Kazunori *et al.*, 2019).

Las teorías modificadas de la gravedad

Existe un principio filosófico denominado “La Navaja de Ockham” (Ariew, 1976), el cual establece que, en un conjunto de posibles explicaciones para un mismo fenómeno, la explicación más simple suele ser la correcta. Parece ser que éste es el caso de la teoría general de la relatividad de Einstein, de acuerdo a los hallazgos obtenidos por David Hilbert, famoso físico y matemático contemporáneo de Einstein. En una frenética carrera por el descubrimiento de la teoría correcta de la gravedad en 1915, la cual ganó Einstein en el último momento, David Hilbert dedujo la teoría general de la relatividad siguiendo un camino distinto al de Einstein (Hilbert, 1915), camino que, con el tiempo, se convirtió en la forma usual en la que los físicos postulan y/o describen las leyes de la naturaleza. Este camino consiste en formular una cantidad física denominada “acción”, la cual contiene toda la información sobre el contenido material y energético del sistema físico considerado, así como de las interacciones presentes. Curiosamente, cuando se intenta construir la acción más simple posible que describa un espacio-tiempo con curvatura, el resultado es aquella que da lugar a la relatividad general, en una clara e imponente demostración del principio de la navaja de Ockham. Por esta razón, tal acción se conoce actualmente como “la acción de Einstein-Hilbert”.

Si bien la teoría general de la relatividad es la descripción de la interacción gravitacional más consistente y acorde con las observaciones, su éxito se ha visto ligeramente opacado por la existencia confirmada de un par de entes para los cuales aún no se tiene explicación y de cuyo origen la relatividad general no dice nada. Tales entes son la “materia oscura” y la “energía oscura”. La materia oscura corresponde a un extraño conjunto de partículas que no experimentan las fuerzas eléctrica y magnética, por lo que no podemos observarlas directamente (la luz, que es la que permitiría ver a estas partículas, es una onda electromagnética); la necesidad de su existencia se ha confirmado (Weinberg, 2008; Ellis, Maartens & MacCallum, 2012) mediante observaciones de la rapidez de las estrellas en sus

órbitas alrededor del centro de la galaxia así como de las propiedades estadísticas de la radiación cósmica de fondo (el remanente o fósil del Big Bang). La energía oscura es aún más extraña ya que ni siquiera corresponde a un conjunto de partículas: es simplemente un fluido de algo que no conocemos y que genera presiones negativas; aún así, aun cuando este fluido sea muy extraño, la existencia del mismo ha sido confirmada a través de variadas mediciones, particularmente aquéllas relacionadas con la actual expansión acelerada del universo (Amendola & Tsujikawa, 2010) y, como en el caso de la materia oscura, a través de las propiedades del fósil del Big Bang (Weinberg, 2008; Ellis, Maartens & MacCallum, 2012). En conjunto, la materia y energía oscuras conforman el 95% de todo el contenido del universo, lo cual ha conducido a los Físicos a la búsqueda de una explicación coherente y razonable de este par de entes. Variados han sido los intentos: se ha postulado la existencia de nuevas partículas, aún no vistas en el laboratorio, que darían cuenta de la materia oscura (Ellis, Maartens & MacCallum, 2012); se han propuesto contenidos materiales con propiedades extrañas que podrían dar cuenta de la energía oscura (Amendola & Tsujikawa, 2010); y se ha argumentado que sólo una teoría de la gravedad que incluyera los efectos cuánticos del espacio-tiempo (la relatividad general es una teoría que, en lo absoluto, no se encuentra enmarcada en el contexto cuántico), y de la cual aún no se dispone en una forma plenamente consistente y terminada, podría dar cuenta tanto de la materia como de la energía oscura (Smolin, 2008); por lo que se señala que, quizás, la explicación resida en una violación al principio de la navaja de Ockham, es decir, en una acción que describa la curvatura del espacio-tiempo pero que vaya más allá de la de Einstein-Hilbert (Heisenberg, 2019), distinta a una manzana normal que involucre una extraña y diferente, quizás una manzana cúbica. Esta última posibilidad recibe el nombre genérico de “teorías modificadas de la gravedad”.

El grupo de física, “Fenomenología de partículas elementales y cosmología”, de la Universidad Antonio Nariño, en conjunto con el grupo de investigación “Relatividad y gravitación” de la Universidad Industrial de Santander y el grupo de astropartículas y cosmología del Instituto de Astrofísica de París han venido siendo, en los últimos años, actores importantes en el desarrollo de un particular tipo de teorías modificadas de la gravedad, la denominada “teoría generalizada de Proca SU(2)” (Allys, Peter & Rodríguez, 2016). El principio fundamental sobre el que se basa la construcción de esta teoría es muy simple: cualquier teoría coherente, es decir, sin patologías o comportamientos anómalos, podría ser la correcta, el veredicto último teniéndolo las observaciones, pero ninguna teoría con patologías podría ser la escogida por la naturaleza (un ejemplo de patología es cuando la energía del sistema no posee un límite inferior, permitiendo que el sistema caiga indefinidamente a estados de energía negativa cada vez mayor, lo que hace de este proceso algo infinito e inconsistente). La teoría generalizada de Proca busca precisamente eso: dar cuenta de la acción más general posible que no involucre comportamientos anómalos (Allys, Peter & Rodríguez, 2016a, 2016b; Heisenberg, 2014; Tasinato, 2014; Beltrán & Heisenberg, 2016; Ally, Beltrán, Peter

& Rodríguez, 2016; Rodríguez & Navarro, 2017). El estudio de esta teoría está en desarrollo y, aun cuando no se ha podido reproducir consistentemente la existencia de energía oscura, a pesar de hallazgos promisorios (Rodríguez & Navarro, 2018), sí se ha podido dar cuenta exitosamente de la existencia de un período de expansión acelerada primordial (previo al Big Bang) denominado “inflación” (Garnica, Gómez, Navarro & Rodríguez, 2020), cuya mayor virtud reside en la explicación del origen y adecuada descripción de las estructuras a gran escala en el universo: galaxias (agrupaciones de estrellas), cúmulos galácticos (agrupaciones de galaxias), supercúmulos (agrupaciones de cúmulos), y filamentos (agrupaciones de supercúmulos). Aún falta mucho por analizar y descubrir. A pesar de que las mediciones siguen respaldando a Einstein, estas no son inconsistentes con las teorías modificadas de la gravedad. Quizás, después de todo, la manzana que vio caer Newton tenía forma cúbica (Ver Imagen 8).



Figura 8: La manzana es cúbica o es redonda?: he ahí la cuestión.



Yeinzon Rodríguez García

Centro de Investigaciones en Ciencias Básicas y Aplicadas, Universidad Antonio Nariño.

Escuela de Física, Universidad Industrial de Santander.

Asociado Simons en The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics.

Es Investigador de la Universidad Antonio Nariño y profesor titular de la Universidad Industrial de Santander. Obtuvo sus títulos de Físico y Magíster en Ciencias -Física- en la Universidad Nacional de Colombia, y su grado de PhD in Physics en la Universidad de Lancaster en el Reino Unido, bajo la supervisión del profesor David H. Lyth.

Referencias

- Abbott, B. P. et. al. (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory Collaboration. *Physical Review Letters*, 116, 061102.
- Allys, E., Beltrán Almeida, J. P., Peter, P. & Rodríguez, Y. (2016). On the 4D generalized Proca action for an Abelian vector field. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 1609, 026.
- Allys, E., Peter, P. & Rodríguez, Y. (2016a). Generalized SU(2) Proca theory. *Physical Review D*, 94, 084041.
- Allys, E., Peter, P. & Rodríguez, Y. (2016b). Generalized Proca action for an Abelian vector field. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 1602, 004.
- Amendola, L. & Tsujikawa, S. (2010). *Dark Energy*. Londres: Cambridge University Press.
- Ariew, R. (1976). *Ockham's Razor: A Historical and Philosophical Analysis of Ockham's Principle of Parsimony*. Champaign-Urbana: University of Illinois.
- Beltrán Jiménez, J. and Heisenberg, L. (2016). Derivative self-interactions for a massive vector field. *Physics Letters B*, 757, 405.
- Einstein, A. (1905). Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik* 17, 891.
- Einstein, A. (1915). Die Feldgleichungen der Gravitation, Preussische Akademie der Wissenschaften. *Sitzungsberichte*, 844.
- Einstein, A. (1916). Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie. *Annalen der Physik* 49, 769.
- Ellis, G. F. R., Maartens, R. & MacCallum, M. A. H. (2012). *Relativistic Cosmology*. Londres: Cambridge University Press.
- Garnica, J. C., Gómez, L. G., Navarro, A. A. & Rodríguez, Y. (2019). Generalized SU(2) Proca inflation [Trabajo en proceso].
- Heisenberg, L. (2014). Generalization of the Proca action. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 1405, 015.
- Heisenberg, L. (2019). A systematic approach to generalizations of General Relativity and their cosmological implications. *Physics Reports*, 796, 1.
- Hilbert, D. (1915). Die Grundlagen der Physik [Foundations of Physics], Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen. *Mathematisch-Physikalische Klasse*, 3: 395.
- Kazunori, A. et. al.(The Event Horizon Telescope Collaboration). (2019). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875, L1.
- Newton, I. (1687/1993): *Principios matemáticos de la Filosofía natural* [Philosophiae Naturalis Principia Mathematica]. Barcelona: Ediciones Altaya.
- Rodríguez, Y. & Navarro, A. A. (2017). Scalar and vector Galileons. *Journal of Physics: Conference Series*, 831, 012004.
- Rodríguez, Y. & Navarro, A. A. (2018). Non-Abelian S-term dark energy and inflation. *Physics of the Dark Universe*, 19, 129.
- Smolin, L. (2008). *The trouble with Physics: the rise of string theory, the fall of a science, and what comes next*. United Kingdom: Penguin.
- Tasinato, G. (2014). Cosmic acceleration from Abelian symmetry breaking. *Journal of High Energy Physics*, 1404, 067.
- Weinberg, S. (1972). *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*. Washington: Wiley.
- Weinberg, S. (2008). *Cosmology*. Londres: Oxford University Press.