

# Einstein ¿sigue teniendo razón?

Nicolás Yunes

© ESO/L. Calçada

## Introducción

El 25 de noviembre de 1915, Albert Einstein le regala a la humanidad su *Teoría de la Relatividad General* (RG). Cien años después, la comunidad científica continua regocijándose con las variadas consecuencias de esta teoría, como la existencia de agujeros negros y estrellas de neutrones. Hoy por hoy, no existe prueba concreta que señale que Einstein estaba equivocado, pero la búsqueda continúa porque la RG es intrínsecamente incompatible con la Teoría de la Mecánica Cuántica. Las variadas hipótesis que intentan unificar estas dos teorías requieren una modificación fundamental de alguno de los pilares básicos de una de las dos. La esperanza de muchos es que una futura observación encontrará una desviación de la RG que señalará el camino correcto a seguir; tal vez así se iniciará una revolución científica similar a la que ocurrió con la mecánica clásica de Newton a raíz (entre otras cosas) de la observación de la precesión del perihelio de Mercurio por Le Verrier en el año 1859.

No es coincidencia, entonces, que haya habido un gran crecimiento en el área experimental dedicada a la RG desde su descubrimiento en 1915. Históricamente, los tests “clásicos” de la teoría, como la desviación de la luz estelar por el Sol, contribuyeron a establecerla como la teoría reinante. Desde entonces, se han realizado una inmensidad de experimentos terrestres, observaciones en el sistema solar, en otras galaxias y con púlsares binarios, que continúan confirmando la teoría. Una parte de éstos ha refinado las comprobaciones clásicas de la teoría, encapsuladas hoy en el marco de la teoría post-newtoniana parametrizada (ppN por sus siglas en inglés) [1] de los años 70. Las pruebas modernas van mucho más allá, y se concentran en la búsqueda experimental de desviaciones de los principios básicos y fundamentales de la teoría de Einstein. En este corto ensayo, intentaremos hacer un breve repaso de estas últimas [1-4].

## Experimentos terrestres y en el sistema solar

La mayoría de los experimentos que se han realizado en nuestro planeta o cerca de él intentan verificar el *Principio de Equivalencia*. En su versión *débil*, este principio estipula que la aceleración de cualquier cuerpo libre producida por un campo gravitacional externo es independiente de su estructura y composición, ignorando su auto-campo gravitacional. Actualmente, no existe indicio alguno que indique una violación de este principio. El límite más estricto ha sido encon-

trado por el grupo Eöt-Wash con péndulos de torsión [5]: la aceleración diferencial de dos cuerpos de distinta composición debe ser menor que  $2 \times 10^{-13}$  de la aceleración promedio de ambos cuerpos. Otros experimentos, como MICROSCOPE, Galileo-Galilei, STEP y la medición de la posición de la Luna con láseres, intentarán establecer mejores límites [2].

La versión original de Einstein de este principio añade la invariancia local de Lorentz y de posición. Estos requerimientos exigen que los resultados de cualquier experimento local (que no se desarrollen en un campo gravitatorio) sean independientes de la velocidad y la posición del laboratorio inercial donde sean realizados. El marco moderno en el cual se examina el principio de invariancia de Lorentz es el de la *Extensión del Modelo Estándar* [6]. En este marco, se agregan todo tipo de interacciones a la acción del Modelo Estándar que violen la invariancia de Lorentz; luego, se intenta restringir la magnitud de los coeficientes de cada interacción a través de experimentos con aceleradores de partículas, o con otras observaciones, como la birrefringencia en la propagación de fotones, la radiación gravitacional de Cerenkov, y las oscilaciones de neutrinos.

La invariancia local de posición ha sido analizada a través de comparaciones de relojes atómicos en diferentes campos gravitacionales. El límite más estricto impone desviaciones fraccionarias menores que  $2 \times 10^{-4}$  y ha sido obtenido por Gravity Probe-A [7] con máseres de hidrógeno. El proyecto ACES planea mejorar este límite con relojes de átomos atrapados en frío, que serán colocados en la Estación Espacial Internacional en 2016. Estos experimentos restringen la posibilidad de que las constantes fundamentales de la física no gravitacional cambien temporal y espacialmente.

La versión *fuerte* del Principio de Equivalencia también se ha puesto a prueba con observaciones en nuestro sistema solar. Esta versión le añade a la de Einstein la inclusión de experimentos que involucren a cuerpos muy densos que produzcan un campo gravitacional fuerte, como el de las estrellas. Una manifestación clásica de la violación de este principio es el efecto de Nordtvedt [8], en el cual dos cuerpos estelares densos de distinta composición se aceleran de manera diferente en presencia de un campo gravitacional externo. Este efecto es análogo a una violación del principio de equivalencia débil, excepto que ahora los cuerpos en discusión poseen su propia gravedad y la diferencia en aceleración es entonces

proporcional a la energía gravitatoria de cada cuerpo. Este efecto no ha sido encontrado en ninguna observación, con el límite más severo impuesto a través de una combinación de mediciones de la posición de la Luna con láseres y de los experimentos del grupo de Eöt-Wash [1].

Otra predicción fundamental de la RG es que el movimiento o la rotación de los cuerpos con gravedad propia produce una corrección en el campo gravitatorio, que es análoga a un campo magnético producido por una carga eléctrica en movimiento o por un dipolo magnético. Por ejemplo, la rotación de la Tierra causa un arrastre del espacio-tiempo, que a su vez afecta la órbita de los satélites. En particular, este efecto causa que la línea de nodos de la órbita de un giróscopo y su momento angular de rotación sufran una precesión, resultados conocidos como el *efecto de Lense-Thirring* y la precesión *geodésica* respectivamente. Ambos efectos han sido verificados a través de observaciones de satélites terrestres, como Gravity Probe B [9] y LAGEOS [10]. Estas observaciones han restringido desviaciones de las predicciones de la teoría de Einstein con una precisión del 0.3 % y del 20 % respectivamente.

### Tests con púlsares binarios

Todos los análisis mencionados anteriormente tienen un factor en común: utilizan campos gravitacionales débiles y prácticamente estáticos, donde la curvatura del espacio-tiempo es muy pequeña. La magnitud del campo gravitacional y de la curvatura del espacio-tiempo son proporcionales al potencial newtoniano (divido por el cuadrado de la velocidad de la luz  $c$ ),  $U = GM/(Rc^2)$  y al inverso del radio de curvatura  $\mathcal{R}^{-1} = R^{-1} [GM/(Rc^2)]^{1/2}$ , donde  $G$  es la constante de Newton, mientras que  $M$  y  $R$  son la masa y el radio característicos del sistema. Similarmente, la variabilidad temporal del campo gravitacional es proporcional a  $(v/c)$ , donde  $v$  es la velocidad característica del sistema. Por ejemplo, el sistema binario Sol-Tierra tiene  $U \sim 10^{-8}$ ,  $\mathcal{R}^{-1} \sim 10^{-12} \text{ km}^{-1}$  y  $(v/c) 10^{-4}$ . Es por ello que la astrofísica del sistema solar puede ser descrita por la mecánica clásica de Newton con alta exactitud.

Para verdaderamente poder someter a control a la RG uno debe realizar experimentos donde la curvatura del espacio-tiempo y la magnitud y variabilidad temporal del campo gravitacional no sean extremadamente pequeños, como por ejemplo en los púlsares binarios [11]. Los púlsares son estrellas de neutrones que rotan a altas velocidades, algunos a velocidades comparables a las cuchillas de una licuadora. Estas estrellas tienen grandes campos magnéticos  $[(10^7 - 10^{12}) \text{ G}]$  que aceleran fotones en un cono que rota rígidamente con la estrella, como un faro de luz. Si la luz del cono cruza el campo visual de la Tierra, los radiotelescopios terrestres registran un “pulso de fotones,” razón por la que son llamados púlsares. Los púlsares son extremadamente densos, con masas alrede-

dor de  $1.5M_{\odot}$  y radios de sólo  $\sim 12 \text{ km}$ ; sus campos gravitacionales y curvatura son enormes ( $U \sim 0.2$  y  $\mathcal{R}^{-1} \sim 0.04 \text{ km}^{-1}$ ) y la variabilidad temporal también puede ser grande cuando se encuentran en sistemas binarios. El pulsar binario más relativista que ha sido encontrado es el *pulsar doble* J0737-3039A,B [12], compuesto por dos estrellas de neutrones con período orbital de 0.1 días ( $v/c \sim 10^{-3}$ ). Otros púlsares binarios relativistas están compuestos por una estrella de neutrones y una estrella enana blanca, por ejemplo J1738+0333, J1141-6545, y J0348+0432. La estrella de neutrones en este último ejemplo tiene una masa de  $\sim 2M_{\odot}$  y es la más masiva que ha sido encontrada. Recientemente, se ha hallado un sistema orbital triple, J0337+1715, que consiste en un púlsar con dos estrellas enanas en órbita alrededor de él, y con períodos orbitales de 1.6 y 327 días [13].

A partir del descubrimiento de Hulse y Taylor [14] del sistema binario B1913+16 se han realizado muchos tests de la RG con púlsares binarios. De hecho, B1913+16 fue el púlsar con el que se confirmó, por primera vez, que las órbitas de sistemas binarios compactos decaen a causa de la emisión de ondas gravitacionales (ondulaciones en el espacio-tiempo producidas por la aceleración de cuerpos en movimiento) exactamente como lo predice la RG. Las verificaciones de RG con púlsares binarios están hoy encapsuladas en el marco del formalismo post-kepleriano parametrizado (ppK por sus siglas en inglés) [15]. En RG, los elementos orbitales en la parametrización kepleriana (por ejemplo, el argumento del pericentro) adquieren correcciones relativistas que los fuerzan a evolucionar temporalmente. Esta evolución en RG está determinada completamente por las masas del sistema binario. En los análisis de ppK, uno construye curvas de la razón de cambio de cada elemento orbital en el plano de las masas del sistema binario. Si las predicciones de RG son correctas, hay una única intersección de todas las curvas. De esta manera, uno puede poner a prueba la hipótesis nula de que la RG es correcta, sin tener que especificar una teoría alternativa determinada.

Todos estas pruebas intentan confirmar, cada vez con mayor eficacia, el principio de equivalencia fuerte, restringiendo por ejemplo (i) la existencia del efecto de Nordtvedt, (ii) la existencia de sistemas de referencia especiales, (iii) la variabilidad de la constante de Newton, y (iv) la existencia de radiación gravitacional dipolar. Por ejemplo, la existencia de sistemas de referencia especiales ha sido restringida a través de la observación de las órbitas de púlsares binarios y de su falta de torsión en púlsares aislados [11]. Estas observaciones permiten imponer los límites más estrictos [16] a la teoría de Einstein-Æther [17] (una teoría que reintroduce un campo de Æther que selecciona un sistema de referencia especial) y a la gravedad “kronométrica” [18] (el límite de bajas energías

de la gravedad de Hořava, una propuesta de gravedad cuántica que posiblemente es renormalizable).

La existencia de la radiación dipolar merece un párrafo aparte. En la RG, la radiación gravitacional dipolar no está permitida debido a la conservación de momento lineal y al principio de equivalencia fuerte. Sin embargo, hay teorías alternativas que no obedecen el principio de equivalencia fuerte, y, por lo tanto, en donde la radiación dipolar esta permitida. Este tipo de radiación es mucho más fuerte que la radiación gravitacional cuadrupolar de la RG, y entonces los sistemas binarios decaen mucho más rápido en estas teorías alternativas. Las observaciones astrofísicas que han confirmado que los sistemas binarios decaen exactamente como lo predice la RG han permitido establecer límites severos en ciertas teorías escalar-tensoriales, como la de Brans-Dicke y las de  $F(R)$  [1, 2].

### Futuros tests astrofísicos

Hasta hoy, ningún test de RG con púlsares binarios involucra una de las predicciones más fantásticas de la teoría de Einstein: los agujeros negros. Estos objetos son estrellas completamente colapsadas gravitacionalmente, con densidades tan altas que la fuerza gravitatoria no permite que la luz escape de sus *horizontes* de sucesos. La existencia de agujeros negros en el universo ha sido comprobada indirectamente a través de la observación de las órbitas de estrellas tipo-S en el centro de la Vía Láctea. Estas observaciones nos permiten deducir la existencia de un objeto compacto, Sag. A\*, en el centro de nuestra galaxia con una masa de  $\sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ . Pero, aun hoy, no hemos podido determinar si este objeto compacto es realmente un agujero negro tal como los describen las soluciones de las ecuaciones de Einstein, o si es algún otro tipo de objeto oscuro predicho por una teoría alternativa.

Los agujeros negros pueden ser fantásticos laboratorios para examinar la RG, ya que son objetos intrínsecamente no lineales, cuyo campo gravitacional y curvatura del espacio-tiempo cerca del horizonte pueden llegar a la unidad. Ubicado a aproximadamente 8 kpc de nuestro sistema solar, Sag. A\* tiene un tamaño angular de sólo  $\sim 5 \mu\text{s}$ , con lo cual su disco de acreción aún no ha podido ser observado. La misión principal del Event Horizon Telescope [19] es precisamente resolver la sombra creada por el horizonte de Sag. A\* en su disco de acreción. Para alcanzar esta meta, se utiliza interferometría de muy larga base, combinando datos de varios telescopios en el mundo. Estas observaciones nos permitirán medir el momento angular de rotación y el momento cuadrupolar de Sag. A\*, y así verificar los teoremas de agujeros negros sin pelo (véase la contribución de Mars) de RG. Éstos predicen que los momentos multipolares del campo gravitacional exterior de los agujeros negros sin carga eléctrica dependen sólo de la masa y el momento angular de rotación. Otra manera de verificar estos teoremas

es a través de observaciones de estrellas en órbitas bien cercanas a Sag. A\*. Estas órbitas dependen de todos los momentos multipolares de Sag. A\*, pero el efecto de estos decrece con el orden de los multipolos. La observación de una órbita con semi-eje mayor de menos de un miliparsec sería suficiente para medir el momento cuadrupolar de Sag. A\* [20].

Aun si los objetos compactos satisfacen estos teoremas, esto no implica necesariamente que la teoría de Einstein haya sido verificada. Primero, las soluciones de Schwarzschild y de Kerr que describen agujeros negros en RG pueden también ser soluciones en teorías alternativas [4]. Esto depende de los detalles particulares de la teoría en consideración; existen soluciones de agujeros negros en teorías alternativas que no coinciden con las de Schwarzschild o Kerr [4]. Además, las verificaciones de RG con sombras de Sag. A\* son de hecho pruebas cuasi-estacionarias, ya que sólo dependen del movimiento geodésico del gas en el disco de acreción. En particular, la dinámica no-lineal de las ecuaciones de Einstein no puede ser verificada con estas observaciones.

### Futuros tests con ondas gravitacionales

Estos problemas pueden evitarse a través de la detección de ondas gravitacionales emitidas en los últimos minutos de vida de sistemas binarios compactos (sean estrellas de neutrones o agujeros negros). Estos sistemas son "limpios" astrofísicamente hablando, ya que las incertidumbres astrofísicas tienen un impacto despreciable en la trayectoria de estos cuerpos y, por lo tanto, en las ondas gravitacionales emitidas [4]. Además, en los últimos momentos de vida, estos sistemas binarios pueden adquirir velocidades muy altas ( $v/c = 0.3 - 0.6$ ) de hasta dos órdenes de magnitud mayores que la velocidad orbital del púlsar doble. Al poder acceder a campos gravitacionales enormes y altamente dinámicos, con curvaturas gigantes del espacio-tiempo, uno podrá verificar la RG en un régimen nunca antes explorado. Esto nos permitirá ir mucho más allá del principio de equivalencia fuerte, y de los teoremas de agujeros negros sin pelo, explorando realmente la no linealidad de las ecuaciones de Einstein.

¿Pero qué aprenderemos realmente con la detección de ondas gravitacionales sobre la teoría fundamental de la gravedad? Una de las predicciones básicas de la RG es que las ondas gravitacionales tienen sólo dos polarizaciones, tal como las ondas electromagnéticas. En otras teorías, las ondas pueden tener hasta seis polarizaciones diferentes (dos escalares, dos vectoriales y dos tensoriales) que afectan al espacio-tiempo de manera diferente [1, 2, 4]. Por ejemplo, las ondas gravitacionales en teorías escalares-tensoriales poseen tres polarizaciones. La detección de ondas gravitacionales nos permitirá verificar esta predicción y cualquier desviación sería catastrófica para la RG.

Otro principio básico es que las ondas gravitacionales se propagan en el espacio-tiempo a la velocidad de la luz. Este hecho está íntimamente relacionado con la interpretación de que las ondas gravitacionales son *gravitones*, partículas elementales que no tienen masa, que se propagan en el espacio-tiempo. Algunas teorías que intentan explicar la aceleración del universo reciente predicen que el gravitón tiene masa [21] y, por lo tanto, que se propaga a una velocidad menor que la de la luz. En estas teorías, la relación de dispersión de gravitones masivos sería diferente a la de RG, lo cual afectaría la evolución temporal de la fase de las ondas gravitacionales [4].

Las ondas gravitacionales también pueden limitar fuertemente violaciones de la simetría de Lorentz en el sector gravitacional, siempre y cuando las detectemos en coincidencia con ondas electromagnéticas emitidas por la misma fuente. Un ejemplo de esto sería la detección de ondas gravitacionales de la fusión de estrellas de neutrones en un sistema binario y, coincidentemente, ondas electromagnéticas de la subsiguiente explosión corta de rayos gamma [22]. Detecciones coincidentes de este estilo no son muy probables, pero una sola observación sería suficiente para imponer límites mucho más severos que los que existen actualmente [23].

La detección de ondas gravitacionales nos permitirá explorar la estructura multipolar de la radiación en su totalidad, en vez de sólo limitar la existencia de la radiación dipolar. La evolución frecuencia-temporal de las ondas gravitacionales codifican no sólo la presencia de esta última, sino también la existencia de modificaciones en la radiación cuadrupolar y de más alto orden multipolar. Una verificación de las predicciones de la RG tendría implicaciones drásticas en cuanto a la existencia de polarizaciones adicionales, ya que normalmente éstas también modifican el tipo de radiación gravitacional que es emitida por sistemas binarios.

Otro aspecto que podremos dilucidar con ondas gravitacionales es la estructura de la acción de Einstein y Hilbert. Las teorías de gravedad cuántica típicamente predicen modificaciones en la acción, que luego introducen modificaciones en las ecuaciones de campo. Éstas son generalmente correcciones cuadráticas (o de más alta potencia) en invariantes de la curvatura, que a su vez pueden modificar la estructura de los agujeros negros y de las estrellas de neutrones, como por ejemplo es el caso en la teoría dinámica de Chern-Simons [24] y la teoría de Einstein-Dilaten-Gauss-Bonnet [25]. Si uno requiere que estos modelos sean derivados en el límite de bajas energías de la teoría heterótica de las cuerdas, de teorías efectivas de la inflación, o de la teoría cuántica de bucles [24], toda modificación sería suprimida por la distancia de Planck. Pero requerimientos de este tipo pueden ser peligrosos, ya que pueden existir mecanismos a través de los cuales predicciones derivadas de argumentos di-

mensionales terminan siendo incorrectas, como en el caso de la constante cosmológica.

Las ondas gravitacionales también podrán limitar fuertemente teorías con *mecanismos de ocultación*, como algunas teorías escalar-tensoriales que han evadido controles basados en observaciones en el sistema solar. Este mecanismo hace que la gravedad se reduzca efectivamente a la RG cuando la curvatura del espacio-tiempo es pequeña. Pero en situaciones de gravedad extrema, como en las estrellas de neutrones, un campo escalar puede activarse y modificar la evolución de sistemas binarios a través de la emisión gravitacional dipolar. Este mecanismo de ocultación es opuesto a lo que a veces ocurre en cosmología, donde las situaciones con gravedad fuerte se reducen a RG, pero las predicciones de la teoría de Einstein son modificadas a grandes escalas [27]. La detección de ondas gravitacionales emitidas en la fusión de estrellas de neutrones puede restringir la existencia de estos efectos de manera comparable a la observación de púlsares binarios [28].

Finalmente, otro principio básico de la RG que podrá ser verificado con ondas gravitacionales es la existencia de horizontes de sucesos en agujeros negros. Cuando dos agujeros negros colisionan, el residuo es un nuevo agujero negro cuyo horizonte dinámico [29] vibra como una membrana [30], produciendo ondas gravitacionales con modos cuasi-normales. Estos modos pueden ser utilizados para confirmar los teoremas de no pelo de RG, y específicamente la estructura del espacio-tiempo de los agujeros negros dinámicos. A diferencia de las observaciones electromagnéticas con discos de acreción, estas pruebas no se ven afectadas por incertidumbres astrofísicas.

Todos estas comprobaciones de RG con ondas gravitacionales han sido encapsuladas en el marco del formalismo parametrizado post-einsteiniano [31] (ppE por sus siglas en inglés). En este formalismo, uno agrega ciertos términos a los filtros que serán utilizados para detectar ondas gravitacionales de sistemas binarios con la técnica de *filtros emparejados* [32]. Estos términos representan modificaciones en la evolución de la amplitud y la fase de las ondas gravitacionales de una meta-teoría que es capaz de reproducir todas las predicciones de teorías alternativas, incluyendo la RG. Usando métodos estadísticos de Bayes, se puede identificar la meta-teoría que mejor se adapta a los datos experimentales u observacionales.

Otro marco en el cual se pueden realizar tests de la RG con ondas gravitacionales es mediante el uso de las relaciones de *I-Love-Q* [33]. Estas relaciones predicen que el momento de inercia ( $I$ ), el número de Love (que determina la deformabilidad de las estrellas), y el momento cuadrupolar ( $Q$ ) de las estrellas de neutrones están inter-relacionados de una manera que es aproximadamente *independiente* de la estructura interna de las estrellas, pero depende de la teoría de la gravedad. Es posible que observa-

ciones futuras de púlsares binarios permitan medir el momento de inercia de las estrellas de neutrones. Es también posible que la detección de ondas gravitacionales producidas en la colisión de estrellas de neutrones permitan medir el número de Love. Por lo tanto, a través de las relaciones de I-Love uno puede verificar si estas observaciones son consistentes con las predicciones de RG, sin que importe la estructura interna de las estrellas. Este tipo de pruebas permitirán limitar severamente la existencia de ciertas teorías efectivas de la gravedad cuántica [33].

### Caminante no hay camino

Una de las áreas fundamentales de la ciencia es la falsificación de hipótesis y el derrumbamiento de estructuras teóricas para dar lugar a rascacielos cada vez más inclusivos. Preguntarse por qué seguir poniendo a prueba la teoría de Einstein es como preguntarse por qué intentar entender el funcionamiento del universo. No se puede avanzar en la ciencia, y en particular en la astrofísica, sin un continuo cuestionamiento de nuestros métodos y nuestros resultados. No hacerlo sería establecer un dogma que estancarí el progreso de la ciencia indefinidamente. En los últimos cien años, la comunidad científica ha realizado estos cuestionamientos de manera exhaustiva, y, sin embargo, tal vez insospechadamente, la RG ha aguantado sistemáticamente todos estos exámenes y todos los intentos de modificación. Pero aún así queda mucho más por hacer. ¿Son los objetos oscuros y compactos del universo realmente los agujeros negros de Einstein? ¿Los gravitones son masivos o no? ¿Es el universo simétrico, como lo predijeron Lorentz y Einstein con su principio de equivalencia? Tal vez las estructuras fundamentales del universo son más que un promedio de las fluctuaciones que sólo efectivamente pueden ser descritas por un tensor métrico. Estas preguntas y muchas más podrán responderse en los próximos años a través de los increíbles esfuerzos teóricos y experimentales que están hoy recién empezando. Es imposible adivinar el camino que la ciencia seguirá en el futuro cercano; sólo podemos esperar y seguir haciéndonos camino al andar.

### Referencias

- [1] C. M. WILL, *Living Rev. Rel.* **17**, 4 (2014), 1403.7377.
- [2] C. M. WILL (2014), 1409.7871.
- [3] D. PSALTIS, *Living Rev. Rel.* **11**, 9 (2008), 0806.1531.
- [4] N. YUNES y X. SIEMENS, *Living Rev. Rel.* **16**, 9 (2013), 1304.3473.
- [5] S. SCHLAMMINGER, K.-Y. CHOI, T. WAGNER, J. GUNDLACH y E. ADELBERGER, *Phys. Rev. Lett.* **100**, 041101 (2008), 0712.0607.
- [6] D. MATTINGLY, *Living Rev. Rel.* **8**, 5 (2005), gr-qc/0502097.
- [7] R. F. C. VESSOT, M. W. LEVINE, E. M. MATTISON, E. L. BLOMBERG, T. E. HOFFMAN, G. U. NYSTROM, B. F. FARRER, R. DECHER, P. B. EBY y C. R. BAUGHER, *Phys. Rev. Lett.* **45**, 2081 (1980).
- [8] K. NORDTVEDT, *Phys. Rev.* **169**, 1014 (1968).
- [9] C. EVERITT, D. DEBRA, B. PARKINSON, J. TURNEAURE, J. CONKLIN, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 221101 (2011), 1105.3456.
- [10] I. CIUFOLINI y E. PAVLIS, *Nature* **431**, 958 (2004).
- [11] D. R. LORIMER, *Living Rev. Rel.* **8**, 7 (2005), astro-ph/0511258.
- [12] A. LYNE, M. BURGAY, M. KRAMER, A. POSSENTI, R. MANCHESTER, F. CAMILO, M. MCLAUGHLIN, D. LORIMER, N. D'AMICO, B. JOSHI *et al.*, *Science* **303**, 1153 (2004), astro-ph/0401086.
- [13] S. RANSOM, I. STAIRS, A. ARCHIBALD, J. HESSELS, D. KAPLAN *et al.* (2014), 1401.0535.
- [14] R. HULSE y J. TAYLOR, *Astrophys. J.* **195**, L51 (1975).
- [15] T. DAMOUR y J. H. TAYLOR, *Phys. Rev.* **D45**, 1840 (1992).
- [16] K. YAGI, D. BLAS, N. YUNES y E. BARAUSSE, *Phys. Rev. Lett.* **112**, 161101 (2014), 1307.6219.
- [17] T. JACOBSON y D. MATTINGLY, *Phys. Rev.* **D64**, 024028 (2001), gr-qc/0007031.
- [18] D. BLAS, O. PUJOLAS y S. SIBIRYAKOV, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 181302 (2010), 0909.3525.
- [19] A. RICARTE y J. DEXTER, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* **446**, 1973 (2015), 1410.2899.
- [20] D. PSALTIS, F. OZEL, C.-K. CHAN y D. P. MARRONE (2014), 1411.1454.
- [21] C. DE RHAM, G. GABADADZE y A. J. TOLLEY, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 231101 (2011), 1011.1232.
- [22] A. NISHIZAWA y T. NAKAMURA, *Phys. Rev.* **D90**, 044048 (2014), 1406.5544.
- [23] D. HANSEN, N. YUNES y K. YAGI (2014), 1412.4132.
- [24] S. ALEXANDER y N. YUNES, *Phys. Rept.* **480**, 1 (2009), 0907.2562.
- [25] N. YUNES y L. STEIN, *Phys. Rev. D* **83**, 104002 (2011), 1101.2921.
- [26] T. DAMOUR y G. ESPOSITO-FARESE, *Classical and Quantum Gravity* **9**, 2093 (1992).
- [27] J. KHOURY y A. WELTMAN, *Phys. Rev.* **D69**, 044026 (2004), astro-ph/0309411.
- [28] L. SAMPSON, N. YUNES, N. CORNISH, M. PONCE, E. BARAUSSE *et al.*, *Phys. Rev.* **D90**, 124091 (2014), 1407.7038.
- [29] A. ASHTEKAR y B. KRISHNAN, *Living Rev. Rel.* **7**, 10 (2004), gr-qc/0407042.
- [30] K. S. THORNE, R. H. PRICE y D. A. MACDONALD, BLACK HOLES, *The membrane paradigm* (Yale University Press, 1986).
- [31] N. YUNES y F. PRETORIUS, *Phys. Rev. D* **80**, 122003 (2009), 0909.3328.
- [32] P. JARANOWSKI y A. KROLAK, *Living Rev. Rel.* **8**, 3 (2005), 0711.1115.
- [33] K. YAGI y N. YUNES, *Phys. Rev. D* **88**, 023009 (2013), 1303.1528.



**Nicolás Yunes**

Department of Physics,  
Montana State University,  
Bozeman, EE. UU.