

Capítulo 2

Relatividad General o la atractiva gravedad del ser

La necesidad de coherencia entre las teorías de la física llevó a la elaboración de la relatividad general en donde la gravitación no es otra cosa que la curvatura geométrica del espaciotiempo. Gran parte de la presencia *mediática* de la física contemporánea atestiguada a través de nombres como agujeros negros, ondas gravitacionales o expansión del universo, se deben a la relatividad general.

El desafío de Einstein o por qué una nueva teoría de la gravedad

La moraleja del capítulo anterior es que la constancia de la velocidad de la luz y el entrelazamiento del espacio con el tiempo en la estructura espaciotiempo, debe reflejarse en las leyes de la física, o dicho en otras palabras, las leyes de la naturaleza deben ser formuladas de tal suerte que sean compatibles con el hecho de que la velocidad de la luz es una constante universal. Las dos grandes teorías fundamentales a comienzos del siglo XX eran la Teoría de Gravitación Universal de Newton y la teoría electromagnética. Curiosamente y a pesar de que sus creadores no lo sabían, el electromagnetismo ya era relativista, evidencia de que las buenas teorías suelen dar más de lo que sus creadores pusieron en ella. Fue la teoría electromagnética la que predecía la propagación de ondas electromagnéticas a una velocidad privilegiada c que no dependía del sistema de referencia y la que disparó la crisis que desembocó en la relatividad especial. Sólo faltaba ‘vestirla’ con el vestuario adecuado, es decir, re-escribirla en el lenguaje espaciotemporal para que desplegara su manifiesto atuendo relativista.

La teoría newtoniana de la gravedad en cambio era honestamente no relativista. En efecto, la esencial de la teoría de Newton está en la expresión para la fuerza con la que una masa puntual M atrae a otra m situada a una distancia r de la primera:

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2-1)$$

Donde G representa la constante gravitacional de Newton que mide la intensidad intrínseca de la gravedad.

La fórmula (2-1) tiene muchas virtudes: con ella se conoció el funcionamiento de la maquinaria del Sistema Solar, se predijeron eclipses, se entendieron las mareas y se conocieron las intenciones de los enigmáticos cometas. Se unificó la gravedad terrestre con la celeste al advertir que los cuerpos caen contra la superficie de la Tierra obedeciendo la misma ley que hace girar a los astros alrededor de sus órbitas; y que todos los cuerpos aquí o en los confines del universo, ahora o hace millones de años, se atraen unos a otros de acuerdo con la ley (2-1) porque es una ley universal y por tanto de muy difícil derogación. Ciertamente la Ley de gravitación universal tiene muchas virtudes, y por eso reinó sin oposición ni conflicto con las observaciones durante más de dos siglos. Pero tiene un pecado original: es incompatible con el *dictum* de la relatividad especial de acuerdo con el cual queda terminantemente prohibida la propagación de señal alguna a una velocidad superior a c . La ley newtoniana de la gravedad, al depender únicamente de la distancia entre las dos partículas supone que la gravedad se propaga instantáneamente, es decir a velocidad infinita. Por ejemplo, una sacudida del sol, ¿en qué momento afecta a la Tierra? La teoría de Newton diría que simultáneamente. La relatividad diría que no antes de los ocho minutos que tarda la luz en transitar la distancia del sol a la Tierra.

Si la teoría newtoniana de la gravedad es incompatible con la relatividad, a pesar de dos siglos de éxitos, abandónala y construye otra teoría que reproduzca los éxitos sin compartir los defectos, pudo haber pensado Einstein, aceptó el desafío de propuso exorcizar a la gravedad del pecado de instantaneidad. Para ello concibió su monumental relatividad general: la teoría relativista del campo gravitacional.

El Principio de Equivalencia

Si en la relatividad especial la concepción de la unidad espaciotiempo se reveló fundamental para las leyes de la física, en la relatividad general Einstein dio un audaz paso al mostrar la relevancia de la noción de espaciotiempo curvo en trance de describir los fenómenos gravitacionales.

Imaginemos a un físico encerrado en una cabina que le sirve de laboratorio y consideremos estas cuatro escenas (ver Figura 6):

1. La cabina está quieta en la superficie de la Tierra.
2. La cabina está en el espacio interestelar acelerada con aceleración constante e igual a g .
3. La cabina está cayendo libremente en el campo gravitacional de la Tierra.
4. La cabina está en el espacio interestelar libre, no sometida a ninguna fuerza.

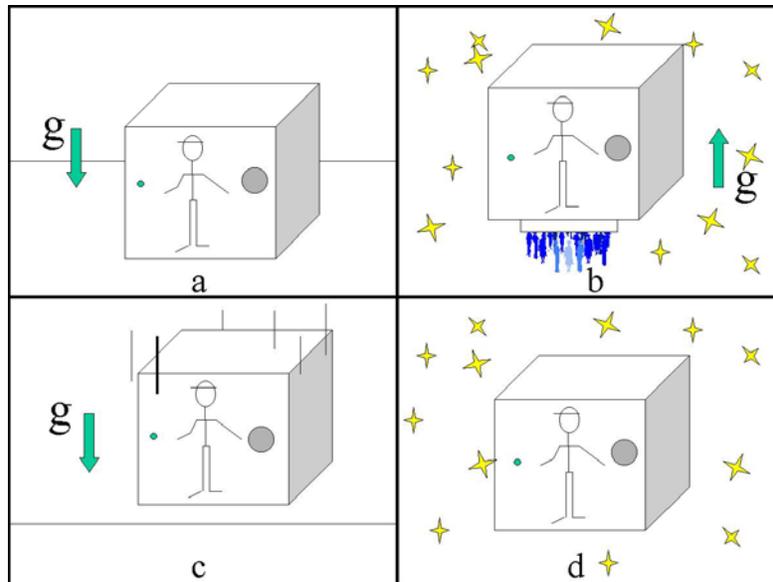


Figura 6. Las cuatro escenas descritas arriba. (a) Un campo gravitatorio uniforme. (b) Aceleración uniforme. (c) El laboratorio en caída libre. (d) Ausencia de gravedad.

Nuestro físico no podría distinguir (salvo que mire por la ventana) la situación (a) de la (b). Ni podrá distinguir las dos últimas entre sí. En efecto, las propiedades de caída de cuerpos sometidos a la gravedad pueden ser simuladas acelerando un laboratorio adecuadamente. La fuerza inercial que aparece en un sistema acelerado produce idénticos efectos que un campo gravitacional ‘de verdad’. Por ejemplo, si el físico en (a) deja caer dos cuerpos de diferentes masas, verá que caen igual, es decir, con la misma aceleración, detalle que no se le escapó a Galileo. En la escena (b), un observador externo verá que las dos masas flotan libres en el espacio y es el piso el que choca con ellas.

Similarmente, en la escena (c) el físico con las dos masas y su laboratorio caen todos a la misma aceleración y por tanto en reposo relativo, exactamente como estuvieran en la cuarta situación.

En pocas palabras, Einstein advirtió que la gravedad puede ser anulada localmente (en extensiones “grandes” el campo gravitatorio real se distingue del ficticio porque las trayectorias de las masas no son paralelas entre sí) eligiendo un sistema en caída libre o creada eligiendo un sistema acelerado, y a esta equivalencia entre los efectos de un campo gravitacional real y los de un campo de fuerzas inerciales ficticio, la

elevó a la categoría de Principio: no hay experimento físico alguno que logre distinguir entre la gravedad y los efectos de usar un sistema convenientemente acelerado. Además dijo que ese había sido el pensamiento más feliz de su vida.

La construcción de una teoría de gravedad exigía (vía principio de equivalencia) extender la democracia entre los privilegiados observadores inerciales, a todos los observadores en estado de movimiento arbitrario. En la relatividad general las descripciones hechas desde cualquier sistema de referencia en movimiento arbitrario, son equivalentes. Pero la declaración de esta democracia ampliada habría de tener una consecuencia crucial.

Imaginemos que un observador inercial envía un haz de luz, que viaja como debe ser, en línea recta. El haz entre por una cavidad de la cabina del físico en la escena 2, y como la cabina está acelerada, mientras el haz choca con la pared opuesta, la cabina se ha desplazado, de modo que el haz luce curvado. Si la situación 2 es idéntica a la 1, entonces el físico con su cabina en la Tierra *debe* constatar que el haz se curva como consecuencia del campo gravitacional de la Tierra. Si la luz se desplaza en el espacio y el tiempo siguiendo líneas rectas, entonces lo que este experimento imaginario está sugiriendo es que la gravedad curva el espacio y el tiempo, es decir, el espaciotiempo. Otra sugerencia de que ese debía ser el camino es que cuando se considera el intervalo del espaciotiempo de Minkowski (ecuación 1-7) en las coordenadas de un observador acelerado, el intervalo luce como la distancia entre dos puntos cercanos en una geometría curvada. La siguiente ironía urdida por Sir Bernard Shaw sirve para finalizar esta sección:

“Newton, como buen inglés postuló un Universo rectangular porque los ingleses usan la palabra “*square*” para demostrar honestidad, verdadero, rectitud. Newton sabía que el Universo consta de cuerpos en movimiento y que ninguno de ellos se mueve en línea recta, ni podría hacerlo. Pero un inglés no se amilana por los hechos. Para explicar por qué los cuerpos se mueven así, inventó una fuerza llamada gravitación y entonces erigió un complejo universo británico y lo estableció como una religión en la que se creyó por trescientos años. El libro de esa religión no es esa cosa oriental mágica: la Biblia, es el tablero de Trenes Ingleses, que da las estaciones de todos los cuerpos celestes, sus distancias, las velocidades a las que viajan y la hora a la que llegan a eclipsar puntos o estrellarse contra la Tierra. Todo ítem es preciso, comprobado, absoluto e inglés.

Trescientos años después de establecido el sistema surge un joven profesor en el medio de Europa y le dice a los astrónomos:

— Caballeros, si Uds. observan el próximo eclipse de sol con cuidado, entenderán qué pasa con el perihelio de Mercurio —....

El joven profesor sonríe y dice que la gravitación es una hipótesis muy útil y da resultados bastante buenos en muchos casos, pero que él, personalmente puede prescindir de ella. Le preguntan ¿cómo? si no hay gravitación los cuerpos celestes se moverían en líneas rectas. Él responde que no hace falta ninguna explicación porque el Universo no es rectilíneo ni exclusivamente británico: es curvilíneo.

El universo newtoniano a partir de allí cae muerto y es suplantado por el Universo de Einstein. Einstein no ha retado los hechos de la ciencia. Ha retado los axiomas de la ciencia y la ciencia ha sucumbido al reto”.

Las ecuaciones de Einstein

Una vez que Einstein vislumbró que la clave para la descripción de la gravedad estaba en trascender el espaciotiempo descrito por la rígida geometría de Minkowski en aras de un espaciotiempo descrito por una geometría curva, el paso siguiente fue aprender las matemáticas necesarias, que habían sido desarrolladas y en el siglo anterior y completadas por Bernard Riemann unos cincuenta años antes; para con el formalismo matemático a mano conseguir las ecuaciones que relacionen las propiedades geométricas de una región del espaciotiempo, con la materia-energía que esté presente en esa región. Las famosas ecuaciones de campo de Einstein fueron publicadas en 1915 y las escribimos aquí para que el lector conozca su apariencia:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu} \quad (2-2)$$

Las ecuaciones de Einstein son el corazón de la relatividad general. Para decirlo con precisión, ostentación y oscuridad, ellas son un conjunto de diez ecuaciones a derivadas parciales, de segundo orden, acopladas, no lineales para hallar la incógnita fundamental de la teoría: la métrica o los potenciales gravitacionales $g_{\mu\nu}$, un conjunto de cantidades que determinan totalmente la estructura geométrica del espaciotiempo y en particular definen el ritmo del tiempo y el estándar de longitud en cada punto del espaciotiempo.

El lado izquierdo de las ecuaciones (2-2) se conoce como el tensor de Einstein, y son los términos referidos a la geometría del espaciotiempo. El término $T_{\mu\nu}$ al lado derecho se llama tensor de energía-momentum y representa el contenido de materia y su movimiento, o más exactamente, las densidades de masa-energía, los flujos de momentum, presiones y todo aquello que genere campos gravitacionales. En el coeficiente constante delante del tensor de energía-momentum aparece la constante gravitacional de Newton G y la velocidad de la luz c . Este coeficiente expresa la proporcionalidad entre la materia y la geometría del espaciotiempo.

Si en la relatividad especial se selló el matrimonio entre el espacio y el tiempo en una unidad, con la relatividad general se decreta el *menage a trois* de ellos con la materia. Tradicionalmente el espacio y el tiempo eran el escenario fijo, inmutable donde la materia y la energía, partículas y campos ejecutaban el guión prescrito por las leyes de la física. En la concepción einsteniana, el contenido material altera las propiedades geométricas del espacio y del tiempo creando una geometría curvada de acuerdo con la “receta” de las ecuaciones de Einstein, y la materia siente los efectos de esa alteración: “*la materia le dice a la geometría cómo se debe curvar y la geometría le dice a la materia cómo se va a mover*” es la pictórica imagen con que J. A. Wheeler describe el espíritu de la relatividad. El espacio y el tiempo, son ahora actores protagónicos y participativos y no sólo el marco contra el cual se etiquetaban los eventos del mundo físico. El espacio y el tiempo han sido bajados del pedestal de lo trascendente a la arena de los fenómenos físicos, sujetos a los avatares del universo y su evolución, y esto abre enormes e interesantes posibilidades ausentes en la teoría newtoniana. ¿Qué puede ser más sugerente? El espacio y el tiempo o mejor, la curvatura de la geometría del espaciotiempo es la gravitación. El espaciotiempo es ahora un campo físico más que hay que estudiar, y sus leyes (a escala clásica) son las ecuaciones de campo de Einstein.

Lejos de cuerpos que sirvan de fuente de la gravedad, el espaciotiempo está descrito por la geometría de Minkowski y las trayectorias de partículas de prueba son líneas rectas. Cerca de los cuerpos gravitantes el espaciotiempo debe ser descritos con alguna geometría curva que describa las circunstancias físicas concretas.

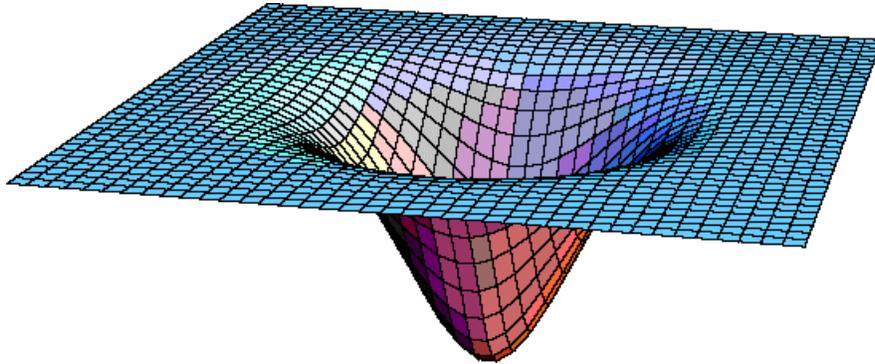


Figura 7. El espaciotiempo deja de ser euclidiano cerca de cuerpos gravitantes. Lejos de ellos la geometría es la de Minkowski. Esta es una representación en dos dimensiones.

Una partícula sigue las trayectorias curvas naturales de esa geometría que se llaman geodésicas (las líneas más rectas). Del mismo modo que una pequeña de la superficie de una esfera puede ser simulada muy aproximadamente con un plano, así mismo una pequeña región de un espaciotiempo curvo (con gravedad) puede ser aproximada a un pequeño espaciotiempo de Minkowski (sin gravedad). Las coordenadas de este espaciotiempo local son el sistema de referencia en caída libre que anula (localmente) la gravedad. Este es el sentido del Principio de Equivalencia.

Curvatura e imaginación

Imaginarse un espaciotiempo curvado es una tarea ardua o para decirlo sin eufemismos, imposible, tanto para el hombre de a pie como para el experto relativista. Ya hemos señalado cómo la noción de espaciotiempo no encaja cómodamente en nuestra percepción. Podemos imaginar un espacio tridimensional donde vale el teorema de Pitágoras, es decir euclidiano, sin curvatura. Y lo podemos imaginar en instantes sucesivos, pero no podemos figurarnos un espaciotiempo curvo. ¿De qué hablamos cuando hablamos de un espaciotiempo curvo? Tenemos una noción clara de lo que es un espacio de dos dimensiones curvo; el ejemplo trillado es la superficie de un balón, que tiene curvatura constante, la misma en todos los puntos. Un jarrón en cambio tiene curvatura variable, mayor en las partes más convexas, menor en las más planas, nula en la base. Podemos concebir la curvatura de una bi-superficie porque la vemos inmersa en nuestras tres dimensiones espaciales; sin embargo, podemos expresar su curvatura (o ausencia de ella) en términos de medidas

hechas sobre la superficie, sin necesidad de abandonarla. Ese análisis se llama geometría intrínseca. Imaginarse la curvatura de un tri-espacio o de un espaciotiempo, es imposible porque estamos inmersos en él y no podemos salirnos a otra dimensión para ver cómo se curva. Pero de nuevo las matemáticas libran por todos: los matemáticos han desarrollado geometrías (curvas o no) en cualquier número de dimensiones (¡ inclusive infinitas dimensiones!!); la geometría intrínseca nos permite calcular la curvatura basándonos en mediciones locales, sin necesidad de abandonar el espacio (o el espaciotiempo) y determinar cuál es la geometría que corresponde a una determinada situación física.

Una pregunta relacionada es por qué la geometría euclidiana es la que nos luce ‘natural’ y la que se da en la realidad. De hecho, durante siglos no se concebía que pudiera haber otra geometría para el espacio, ni siquiera sobre el papel; hasta que en el siglo XVIII los matemáticos construyeron otros sistemas geométricos coherentes y posteriormente la relatividad general consiguió la razón física de la geometría: la gravitación. La geometría euclidiana nos luce natural porque si se calcula su curvatura en la superficie de la Tierra o en el sistema solar, usando las ecuaciones de Einstein, las desviaciones respecto de Euclides no son apreciables. En otras palabras, evolucionamos en un entorno donde la gravedad es demasiado leve como para curvar apreciablemente el espacio. Si viviésemos en la superficie de una estrella neutrónica, constataríamos que las desviaciones de la geometría respecto de la de Euclides, serían de un 20% por culpa de lo intenso del campo gravitacional en la superficie de la estrella y la ‘recta’ geometría euclidiana nos parecería extraña y poco natural.

Predicciones de la relatividad general

La relatividad general es una hermosa teoría. Desde que fue presentada en sociedad hace casi noventa años, sedujo a los físicos por su elegancia y coherencia a pesar de que por su juventud podía mostrar muy pocas evidencias empíricas a su favor. Pero como señalamos en la introducción, belleza y coherencia no basta: la teoría debe mostrar acuerdos con la realidad física. Hoy la situación ha cambiado parcialmente. Sigue subyugando a los físicos como siempre, pero hemos aprendido a hallar e interpretar sus soluciones con nuevas herramientas matemáticas. Disponemos del poder de cálculo de las modernas computadoras que colaboran en el manejo de datos o en simulaciones, y tenemos una sofisticada tecnología experimental y observacional, y con todo este bagaje hemos aplicado la teoría a una variedad de situaciones físicas concretas, hemos corroborado sus fundamentos y sometido a rigurosos exámenes sus predicciones. Desde ya afirmaremos que ha aprobado todos con excelentes calificaciones.

¿Es cierto el Principio de Equivalencia?

Para la relatividad general es de importancia capital corroborar con precisión que la aceleración de diversos cuerpos cayendo en un campo gravitatorio es independiente de la energía y de la composición de dichos cuerpo, porque en caso contrario se viola el Principio de Equivalencia, base de la teoría. En otras palabras, es vital conocer con qué precisión caen igual una pluma y una bala (suponiendo que no hay aire) dejadas caer de la torre de Pisa. Usando largos péndulos con diferentes materiales, Newton concluyó que la aceleración era la misma en una parte en 1.000. Hacia 1900, el Barón Roland von Eötvös usó una balanza de torsión y esferas de aluminio y platino, para demostrar que proporciones diferentes de energías de distinto tipo (nuclear, eléctrica) no alteraban la aceleración relativa de los cuerpos. Su experimento tenía una precisión cercana a la cienmillonésima. En los años setenta la sofisticación tecnológica permitía aseverar que los cuerpos caen igual en el vacío prescindiendo de su masa, al menos en una parte en 10^{12} , convirtiéndose en una de las afirmaciones de la ciencia mejor comprobadas experimentalmente.

¿Qué sucede con cuerpos de dimensiones astronómicas en los que la energía gravitacional es importante? Por ejemplo, la Luna tiene una energía gravitacional por unidad de masa que es 25 veces menor que la de la Tierra. ¿Caen en virtud de esa diferencia de manera distinta la Luna y la Tierra en el campo gravitacional del Sol? La relatividad general predice que caen de idéntica manera; obedeciendo a lo que se denomina el Principio de Equivalencia fuerte, pero otras teorías de gravedad rivales del relatividad predicen lo contrario. ¿Qué dicen las observaciones? Hacer este ‘experimento de Eötvös astronómico fue posible gracias a los espejos que los tripulantes del Apolo 11 y otras misiones no tripuladas a la Luna colocaron en nuestro satélite natural. Enviando rayos Laser y recibiendo su reflejo, conocemos los detalles de la órbita lunar con precisión de varios milímetros. Una aceleración relativa entre la Tierra y la Luna repercutiría en detalles de la órbita verificables fácilmente. Las observaciones hechas por Norvedt concluyeron que a pesar de la composición energética diferente, la Tierra y la Luna caen igual al menos en una parte en 10^{13} , favoreciendo una vez más a la relatividad general.

La relatividad general y la teoría de Newton

Hemos señalado que la teoría de Newton es una buena teoría de la gravedad, rinde cuenta adecuada del movimiento de proyectiles en la Tierra, explica el sistema solar, la dinámica de galaxias y controla el envío de puntuales naves espaciales. No

fue por desacuerdos con los tercios hechos que se creó otra teoría de la gravedad. De modo que un test crucial de la relatividad es que cuando se aplique al sistema solar y sus circunstancias, debe ofrecer esencialmente los mismos resultados que la teoría de Newton. En efecto, el propio Einstein mostró que el sistema newtoniano era la primera aproximación de la relatividad al considerar campos gravitacionales débiles (detalle técnico: campos débiles quiere decir que no aceleren una partícula a velocidades relativistas, o que la energía gravitacional de la fuente del campo sea mucho menor que su masa por la velocidad de la luz al cuadrado). Así las cosas, todo éxito de la teoría de Newton es heredado como un éxito también por la teoría que la envuelve. Eso es bueno. Pero malo a la vez, porque no permite hacer un deslinde entre ambas teorías. Debemos entonces hilar más fino.

Desplazamiento de las órbitas

Cuando se hila más fino en la solución relativista que describe la trayectoria de una masa pequeña alrededor de otra grande (por ejemplo, Mercurio alrededor del Sol), aparece un término ausente en la aproximación newtoniana. El efecto de este término es producir un desplazamiento de la elipse que entonces no se cierra sobre sí misma como predice la teoría de Newton.

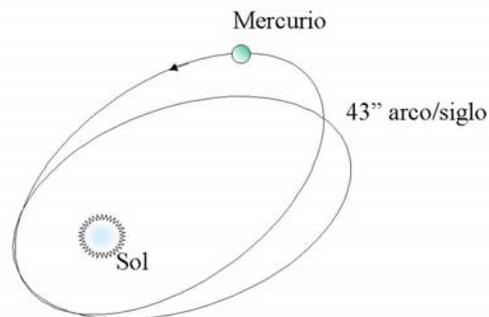


Figura 8. La órbita de Mercurio va girando lentamente, 0,012 grados cada siglo. La relatividad explicó el efecto.

Curiosamente los astrónomos de finales del siglo XIX sabían que la órbita de Mercurio tenía un desplazamiento anómalo de 43'' por siglo (1'' es la 60ava parte de un minuto angular, que a su vez es la 60ava parte de un ángulo de un grado) y a pesar de los múltiples intentos, no habían podido explicarlo. El propio Einstein cuenta que sentía palpitations de la emoción a medida que progresaba en la aplicación de su teoría a la órbita de Mercurio y constataba que el nuevo término explicaba de manera natural estos 43'' con inusitada precisión. ¿Por qué Mercurio? Porque como Mercurio es el planeta más cercano al Sol, 'siente' el campo gravitatorio más fuerte y por tanto los efectos relativistas son mayores. La tecnología actual ha permitido observar este avance del perihelio en otros planetas del sistema solar y compararlo con la predicción teórica de la relatividad general. El resultado lo presentamos en la siguiente tabla:

Astro	Observación (seg/siglo)	Valor Teórico
Mercurio	$43,20 \pm 0,30$	43,03
Venus	$8,4 \pm 4,8$	8,6
Tierra	$5,0 \pm 1,2$	3,8
Icaro	$9,8 \pm 0,8$	10,3

Podemos observar un notable acuerdo entre la predicción teórica y las observaciones en un fenómeno donde la teoría newtoniana nada tiene que decir. Más impresionante es el acuerdo en un sistema binario, dos estrellas de neutrones rotando una alrededor de la otra a una velocidad descomunal porque son dos masas muy grandes (cada una es aproximadamente 1,4 veces la masa del Sol) y muy cerca una de la otra. El 'año' de este sistema es de menos de 8 horas. PSR 1913+16 que es el nombre que identifica a este soberbio laboratorio gravitacional fue descubierto en 1974 y desde entonces ha sido estudiado con gran detalle entre otras cosas porque una de las dos estrellas es un pulsar que nos manda señales de rayos X a intervalos regulares, 17 cada segundo, de modo que es como tener un preciso reloj a disposición en un sistema altamente relativista. Las observaciones de los astrónomos indican que la órbita de PSR 1913+16 se desplaza $4,225^\circ \pm 0,002^\circ$ en apenas un año. Note que este avance es un millón y medio de veces más rápido que el de Mercurio. La predicción teórica de la relatividad es $4,20^\circ \pm 0,3^\circ$; totalmente de acuerdo con las observaciones.

Comportamiento del tiempo

La relatividad general predice que el ritmo con que fluye el tiempo depende del potencial gravitatorio: más lento en regiones donde el potencial es mayor y más rápido en donde es menor. Un reloj colocado cerca de un objeto masivo marcha más lento que otro idéntico muy alejado de la masa que crea el campo. Esta predicción fue hecha por el propio Einstein aun antes de tener sus ecuaciones definitivas, pero fue en los años sesenta cuando vinieron las primeras evidencias.

La frecuencia de la luz emitida por un átomo, por ser un fenómeno periódico, sirve de reloj. En una serie de hermosos experimentos hechos entre el año 1961 y 1965, Rebka, Pound y Snyder compararon la frecuencia de la luz emitida por átomos de hierro en la planta baja del edificio de Física de la Universidad en la que trabajaban y recibida en el techo, con la frecuencia de la luz emitida por átomos similares colocados en el techo. Había un desplazamiento de la frecuencia tal como predecían las ecuaciones de Einstein. Hoy los mejores resultados de experimentos de este tipo confirman la predicción einsteniana en un 0,02%.

Un experimento similar fue llevado a cabo por Vessot monitoreando el ritmo de dos relojes atómicos (tan precisos que podía asegurarse que atrasaban menos de 10^{-9} seg en una hora). Uno de los relojes permaneció en tierra mientras que el otro se montó en cohete Scout para un viaje de dos horas que lo elevaría a 10.000Km de altura (vez y media el radio de la Tierra). En el punto de máximo ascenso, una señal permitía comparar los ritmos de ambos relojes. El reloj de la Tierra marchaba más lento de acuerdo con la teoría. La precisión de este experimento fue de 0,007%.

Finalmente, el correcto funcionamiento de los GPS (Global Positioning System) un conjunto de satélites con relojes, que orbitan la Tierra y nos permiten identificar nuestra posición con una precisión de quince metros (en los sistemas militares son más precisos aun), requiere que se tomen en cuenta los efectos cinemáticos (relatividad especial) y gravitatorios predichos por la teoría, de no ser así, la diferencia del ritmo del tiempo en los satélites y en la superficie de la Tierra induciría errores notables y haría ineficaces en apenas un día a los GPS.

Efecto Shapiro

El efecto Shapiro, denominado el cuarto test de la relatividad general (los otros tres son el desplazamiento de la órbita de Mercurio, el cambio de frecuencia de la luz y la curvatura de los rayos al pasar cerca del sol), es el retraso temporal que sufre una señal que viaja entre dos puntos, cuando en la región que los separa hay un campo gravitacional. Este efecto, predicho en los años sesenta supone por ejemplo que si se

envía desde la Tierra una señal de radar hacia Venus, la señal rebota en Venus y es recibida nuevamente en la Tierra unos 42 minutos después de haber sido enviada, cuando el Sol está en las cercanías de la trayectoria y la señal cruza su campo de gravedad, llega más tarde que en caso contrario. El retraso máximo es de 250 millonésimas de segundo. Las observaciones realizadas en 1967 con Venus y Mercurio confirmaron la predicción de la teoría con un 20% de precisión.

Posteriormente, en los años setenta, un conjunto de mediciones realizadas con naves espaciales Viking y Voyager, cuyas posiciones se pueden conocer con enorme exactitud, verificaron la predicción del retraso de Shapiro con una precisión de 0,1%, es decir, un error de una parte en mil.

Fuera de nuestro sistema solar, el efecto ha sido corroborado en observaciones del pulsar PSR 1937+21, con un 5% de precisión y es cotidianamente tomado en cuenta en la luz que viene de cuasares, en las que el retraso de Shapiro es de varios días.

Ondas gravitacionales

Hemos advertido que la relatividad general fue concebida para tener una descripción de la gravitación sin el pecado newtoniano de transmitirse a velocidad infinita. ¿Satisface la relatividad ese requisito? La respuesta a esta pregunta la dan las ondas gravitacionales. La relatividad general establece que la gravedad es capaz de propagarse a una velocidad que coincide con la velocidad de la luz. Siendo un poco más precisos, Einstein demostró que en alguna aproximación, cuando una distribución de materia cambia (técnicamente, cuando hay un cambio del momento cuadrupolar de un sistema), entonces hay soluciones a las ecuaciones de campo que describen cómo la curvatura de la geometría se propaga, y lo hace a la velocidad de la luz. Este fenómeno tiene un cercano parentesco con la emisión de ondas electromagnéticas pero también hay diferencias importantes. Ambos tipos de ondas son transversales, esto significa que si ellas viajan en una dirección dada, el efecto que ejercen es en el plano perpendicular a esa dirección. En el caso electromagnético la aceleración de cargas produce una perturbación del campo electromagnético que se propaga. En el caso de la gravedad, son masas las que deben ser aceleradas para que se propague la gravitación. En el primer caso, como en la naturaleza hay cargas positivas y negativas, hay dipolos eléctricos cuya variación genera las ondas electromagnéticas (así funciona una antena emisora de ondas de radio, por ejemplo). Como no existen masas negativas, no existen dipolos gravitatorios, de modo que la radiación gravitacional es cuadrupolar, y esto significa que es mucho más débil. Pero además de manera intrínseca la fuerza de gravedad es 10^{40} veces más débil que la

fuerza eléctrica; por eso la gravedad no juega ningún papel en los átomos ni en las moléculas. Se necesitan enormes cantidades de materia (neutra) para que la gravedad sea relevante: las estrellas son grandes porque la constante gravitacional G es pequeña. Todo esto quiere decir que la energía transportada por la radiación gravitacional es extraordinariamente pequeña en circunstancias ordinarias. Una estimación cruda de la energía emitida por unidad de tiempo por un sistema de masa m , distancia típica R ejecutando un movimiento periódico con frecuencia ω nos la da la fórmula

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} \approx \frac{G}{c^5} \omega^6 m^2 R^4 \quad (3-1)$$

El factor $\frac{G}{c^5}$ es responsable de la baja potencia de la radiación, G es muy pequeña y c elevada a la quinta potencia, es muy grande. Por ejemplo, la fórmula (3-1) permite estimar que dos masas de 10 Kg separadas una distancia de un metro y girando con una frecuencia de 1.000 vueltas por segunda, emitirían radiación gravitacional con una potencia $P \approx 10^{-33} \text{ wat}$, de tal suerte que se emite un joule cada 10^{16} años, tiempo mucho mayor que ¡la edad del universo!! Las esperanzas de detectar ondas gravitacionales producidas en el laboratorio o en el sistema solar, son vanas. Debemos buscarlas en los eventos más energéticos del universo.

Estamos acostumbrados a la detección de ondas electromagnéticas. Nuestros propios ojos son un sensible detector de luz visible que se activa apenas con unos cuantos fotones. Hemos aprendido a ‘mirar’ en otras regiones del espectro: antenas de radio y televisión, antenas de microondas, telescopios de infrarrojos, ultravioleta y rayos gamma y viendo al universo por esas ventanas hemos aprendido mucho de su estructura. ¿Es posible detectar ondas gravitacionales y aprender cómo se ve el universo a través de ellas? Actualmente se está haciendo un enorme esfuerzo en la construcción de antenas de ondas gravitatorias. La esperanza es detectar fenómenos violentos en los que masas muy grandes sufran enormes aceleraciones. Por ejemplo, los cálculos sugieren que procesos como formación, choque o coalescencia de estrellas de neutrones, formación o choques de agujeros negros pudieran ser frecuentes y suficientemente energéticos como para detectarlos gravitacionalmente. Proyectos como LIGO (Laser Interferometry Gravitational Observatory), en los Estados Unidos, o el italiano VIRGO, esperan pronto estar en funcionamiento. LIGO son dos brazos en forma de L, de 4Km cada uno en donde un láser se refleja en

espejos colocados en los extremos. La sincronización perfecta de los rayos produce un patrón de interferencia de los láseres. Al llegar una onda gravitacional, uno de los brazos se contrae mientras el otro se estira, produciendo una alteración del patrón de interferencia. Se espera que la primera fase de LIGO comience a finales de 2001 y sea capaz de detectar la perturbación producida por la colisión de dos agujeros negros cuyas masas sean 25 veces la masa del Sol a una distancia de un millardo de años-luz.

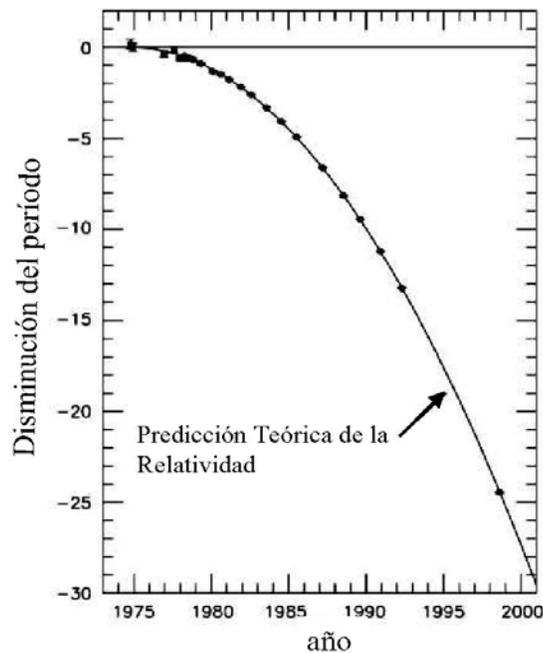


Figura 9. La curva teórica de disminución del período coincide con los puntos observacionales en PSR 1916+13: las ondas gravitacionales existen.

No tenemos aun evidencias directas de radiación gravitacional, pero PSR 1916+13 nos brinda una contundente demostración indirecta de su existencia. En efecto, Hulse y Taylor, sus descubridores fueron recabando datos precisos de su comportamiento durante más de 20 años y advirtieron que su período está disminuyendo lentamente, es decir, realiza sus giros más rápido, ¿Qué puede estar causando esa disminución del período? La respuesta es: las ondas gravitacionales. De acuerdo con la relatividad,

dos masas tan grandes, girando tan violentamente deben emitir ondas gravitacionales (que no detectamos) y al hacerlo pierden energía y por tanto su separación disminuye y por eso aumenta su velocidad de rotación. Los cálculos teóricos basados en la relatividad coinciden notablemente con los datos observacionales, como podemos apreciar de la Figura 9. El descubrimiento y análisis de PSR 1916+13 le depararon a Hulse y Taylor el Premio Nobel de Física en el año 1993.

Curvatura de los rayos de luz

Hemos querido incluir en esta sección un artículo que escribimos al cumplirse 75 años del eclipse que comprobó la predicción de la curvatura de los rayos de luz debida a la gravedad. El artículo apareció en el periódico El Universal.

En el otoño de 1919 Alberto Einstein recibió un telegrama de Heinrich Lorentz que decía:

“Eddington consiguió un desplazamiento de las estrellas en el borde del sol, preliminarmente entre 0,9 segundos de arco y el doble. Saludos. Lorentz.

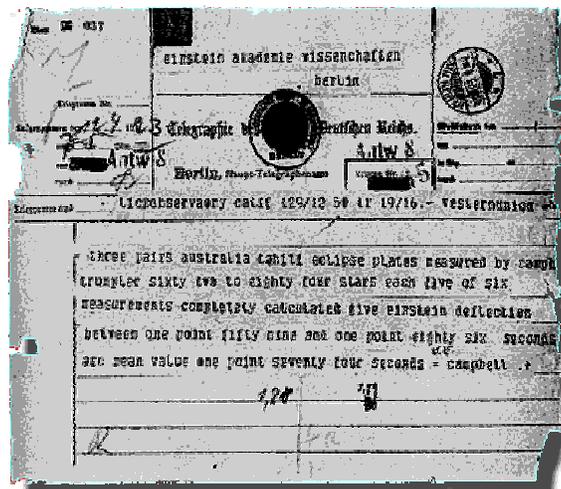


Figura 10. Telegrama donde se le anuncia a Einstein el éxito de su teoría al describir la curvatura de los rayos de luz cercanos al Sol

El futuro Premio Nobel no pudo vislumbrar que unos días después, gracias a ese minúsculo desplazamiento de las estrellas, su vida daría un vuelco inesperado, que lo

convertiría en el científico más popular de todos los tiempos y en una de las unanimidades del siglo XX.

El 7 de noviembre de 1919, hace exactamente 75 años y los días siguientes, el Times de Londres, el New York Time, en nuestro país El Universal y otros periódicos de la época titularon:

“Revolución en la Ciencia: Nueva Teoría del Universo. Ideas Newtonianas derribadas”.

“La luz sesgada en los Cielos. La Teoría de Einstein triunfa. Las estrellas no están donde parecían o donde se había calculado, pero nadie debe preocuparse”.

¿A qué se referían estas noticias? ¿Por qué tanto revuelo alrededor de una teoría científica? ¿Por qué Einstein fue convertido repentinamente en una celebridad mundial por gentes que no comprendían nada de sus trabajos? Las respuestas a estas preguntas forman un interesante capítulo de la historia de la ciencia que ilustra paradigmáticamente el funcionamiento de la ciencia, su forma particular de crecer, y cómo puede estar contaminada por el virus racial. Sus consecuencias tienen mucho que ver en nuestra comprensión actual del Universo.

Los Precursores

No es difícil imaginarse que fue Isaac Newton quien primero conjeturó que la trayectoria de un rayo de luz puede ser curvada por la gravedad: “*¿No actúan los cuerpos sobre la luz a través de la distancia y por su acción curva sus rayos, y no es esta acción más fuerte a distancias menores?*”, prefiguró en un adendum a su *Opticks*. Al fin y al cabo él era el padre de la criatura llamada Ley de Gravitación Universal. Sin embargo no fue sino muchos años después, en 1804, cuando el astrónomo bávaro Johann George Von Soldner respondió lo que la teoría de Newton tenía que decir al respecto: calculó el valor del ángulo que se desviaría un rayo de luz de una estrella que pasase apenas rozando el sol. Soldner consideró a la luz como diminutos corpúsculos e hizo el cálculo como si se tratase de hallar la desviación de un cometa, sólo que por moverse mucho más rápido, la luz se desvía mucho menos. El valor conseguido por Soldner fue de 0,85 segundos de arco.

El trabajo, publicado en una oscura revista, fue rápidamente olvidado, fundamentalmente porque prevaleció la concepción de la luz como una onda, para la cual la teoría de Newton nada tiene que decir respecto una posible desviación.

Einstein

Más de un siglo después, Einstein, empleado como Técnico III en la oficina de Patentes de Berna, tiene el “pensamiento más feliz de su vida” al darse cuenta de que para un observador en caída libre, la gravitación en su entorno desaparece. Einstein ha descubierto que tras la observación de Galileo de que todos los cuerpos caen con la misma aceleración, se enmascara una profunda clave de la naturaleza, y formula el Principio de Equivalencia, piedra angular de lo que habría de ser su teoría de la relatividad general. Dos años antes había formulado la relatividad especial, que establece que ninguna entidad física puede desplazarse a una velocidad mayor que la de la luz. Como la teoría newtoniana de la gravedad suponía una velocidad infinita, se embarca en la formidable tarea de concebir una teoría de la gravitación, libre del pecado de la velocidad infinita. En contra de lo que establece el manual, la motivación para desarrollar lo que habría de ser la relatividad general fue de orden conceptual; no había ni la más remota evidencia experimental u observacional que indicara que la teoría de Newton debía ser corregida o sustituida por otra, no había crisis del paradigma. Se trataba de mantener la coherencia conceptual en la descripción de la naturaleza.

En su trabajo de 1907 Einstein señaló que de acuerdo a su principio de equivalencia, la luz debía curvarse en un campo gravitacional, pero que el efecto era demasiado tenue como para diseñar un experimento en el laboratorio y detectarlo.

En 1911, mientras trabajaba como profesor en la universidad de Praga, logra calcular el ángulo de desviación de un rayo de luz que pase cerca del sol. Todavía no ha dado con la geometría curva como base para su teoría; está más cerca de Newton que de su propio final. Por eso el valor que obtiene es 0,85” de arco!!, el mismo valor de Soldner!!, aunque él desconocía ese trabajo. Pero hay un avance importante. Einstein escribe:

“Ahora me doy cuenta que una de las consecuencias más importantes de las consideraciones previas, es susceptible de verificación experimental”

En efecto, si durante un eclipse de sol se fotografían las estrellas en su periferia, podemos comparar la fotografía con otra de la misma zona del cielo pero cuando el sol no esté presente. Si el sol desvía la trayectoria de la luz, entonces las estrellas lucirán desplazadas y este desplazamiento permitirá calcular cuánto se desvía de la luz.

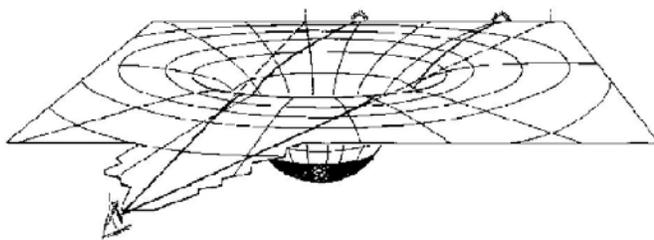


Figura 11. La desviación de los rayos de luz debido a la curvatura del espaciotiempo hace que la posición aparente de las estrellas cuyos rayos pasan cerca del sol, sea diferente de la posición real.

Al año siguiente, en 1912 y como profesor en Zurich, da con la idea del espaciotiempo curvo. Sabe que lo que tiene hasta ahora es una aproximación, pero no sabe aún a qué, y tendrán que pasar varios años más antes de que comprenda cómo la curvatura del espaciotiempo afecta la trayectoria de la luz. Comienza a urgir a los astrónomos para que intenten observar la desviación.

En 1913 decide irse a Berlín como miembro de la Academia Prusiana de Ciencias, sin la presión ni los nervios que le ocasionaba tener que dar clases y en donde podía mantener un cercano contacto con los astrónomos. Max Planck le escribe refiriéndose al *status* de la teoría de gravitación:

“Como un viejo amigo te prevengo que no tendrás éxito, y si lo tienes nadie te creerá...”

En abril del 14 llega a Berlín, separado de su esposa Mileva Maric, y de sus hijos. Allí permanecerá hasta 1932. Todavía no tiene a mano la forma final de su teoría, ni se imagina que el valor del ángulo que está prediciendo no es el correcto. Sin embargo le escribe con demasiada confianza en sí mismo a su gran amigo Michael Besso:

“Ya no dudo de lo correcto del sistema entero, así la observación del eclipse tenga éxito o no.”

Un año después, en noviembre de 1915 presenta la relatividad general en su forma final. Ya ha descubierto (¿o inventado?) las ecuaciones que relacionan la geometría del espaciotiempo, con la materia-energía presente en él. Su teoría concuerda con la de Newton cuando la gravedad es débil, pero difiere de ella para campos gravitacionales intensos. Einstein estrena sus nuevas ecuaciones calculando la trayectoria de un rayo de luz, o como dicen los relativistas, las geodésicas nulas de la geometría. Para su sorpresa el resultado es el doble del valor newtoniano obtenido por Soldner y por él mismo antes de tener su teoría completa. La curvatura del espacio hace que ahora el valor predicho por Einstein sea de 1,75” de arco. Las observaciones durante un eclipse son ahora vitales, porque hay una manera de deslindar entre la teoría de Newton con su espacio absoluto y su ley de gravitación universal, o entre la de Einstein con su geometría curva. Apenas un factor dos debe decidir en la confrontación entre un gigante proclamado y otro emergente.

Las expediciones

Varios caprichos de la historia se confabularon para que Einstein no tuviera que confrontar su predicción equivocada con los resultados de la observación. En efecto, una expedición argentina que viajó al Brasil en 1912 para efectuar observaciones de un eclipse, tuvo que soportar los embates de una tormenta y no observó nada.

En 1914 otra expedición a Crimea, entonces perteneciente a la desaparecida URSS y conducida por Erwin Freundlich, director del Observatorio de Berlín, fue apresada y luego liberada al declararse la Primera Guerra, antes de que pudiera realizar las observaciones. Freundlich no cayó preso porque aún no había viajado, pero cayó presa de una depresión por el fracaso de la expedición y tuvo que ser hospitalizado.

En nuestro país se presentó la nueva oportunidad de observar un eclipse en 1916, cuando Einstein ya había obtenido el valor corregido del ángulo y nuevamente la guerra frustró las esperanzas. En 1917, Sir Arthur Eddington, la gran figura de la astronomía inglesa resaltó con énfasis en una disertación ante la *Royal Astronomical Society* la importancia de medir la desviación de la luz. Nueva decepción al fracasar una expedición norteamericana durante un eclipse en junio de 1918.

Por fin, en 1919, a escasos meses de haberse declarado el fin de las hostilidades, y con una subvención gubernamental de 1.000 libras esterlinas, dos expediciones británicas parten para escrutar el eclipse que habría de producirse el 27 de mayo. Una de ellas va dirigida por Andrew Crommelin, del Observatorio de Greenwich y su

destino es Sobral, en el oriente del Brasil. La otra va para la isla Príncipe enfrente de la costa de la Guinea Española, en Africa, conducida por Eddington, quien antes de zarpar escribió:

“La presente expedición podría por primera vez demostrar el peso de la luz (valor newtoniano), la extraña teoría del espacio no euclidiano, o llegar a un resultado de mayores consecuencias: ninguna curvatura.”

La expedición de Eddington logró apenas dos fotos confiables con apenas cinco estrellas, de un total de 16 placas, porque una tormenta matutina que casi arruina la misión dejó nublado el cielo. La expedición a Sobral tuvo más fortuna con el clima y logró ocho placas con unas siete estrellas cada una. Al regresar comenzó el análisis de las fotografías..

La canonización

El día 6 de noviembre de 1919 ocurrió la canonización de Einstein. Ese día en una solemnísimas reunión conjunta de la Royal Society y de la Astronomical Royal Society dirigida por el astrónomo real, Sir Frank Dyson, Eddington tomó la palabra y difundió oficialmente los resultados de las observaciones del eclipse del 27 de mayo: los datos de la expedición a Sobral confirmaban una desviación de 1,98” con un error experimental de 0,30”, mientras que la de Africa daba 1,61” con igual precisión. Conclusión: la luz se comportaba de acuerdo a lo que la relatividad general establecía. Einstein tenía razón. No faltó, por supuesto, el *advocatus diaboli*, quien se encargó de presentar las *animadversiones*. Ludwick Silberstein, un polaco instalado en Inglaterra previno: ‘No es científico afirmar por el momento que la desviación, cuya realidad admito, se deba a la gravitación.’ Y luego, en tono admonitorio y señalando el cuadro de Isaac Newton que reposaba en una de las paredes del recinto, advirtió: ‘Le adeudamos a ese gran hombre, proceder muy cuidadosamente al modificar o retocar su Ley de Gravitación’. Luego Joseph John Thompson sentenció la canonización: ‘Este es el resultado más importante obtenido en relación con la teoría de gravitación desde los días de Newton, y es apropiado que sea anunciado en un encuentro de la Sociedad tan cercanamente vinculada a élEl resultado es uno de los mas elevados logros del pensamiento humano’.

Nace una estrella

En 1919 Einstein tenía cuarenta años. Justamente el día de los enamorados de ese año, se había divorciado de Mileva y en junio se casó con su doble prima Elsa. Desde muchos años disfrutaba de un sólido y bien ganado prestigio ante sus colegas de la comunidad científica quienes concebían su ciencia como de la más alta calidad, como

lo ilustran las nominaciones al premio Nobel desde 1910 hasta 1922 exceptuando los años 11 y 15. Llevaba una vida de burgués académico que no prefiguraba una fama más allá de las fronteras de la ciencia.

Pero al día siguiente de la histórica sesión conjunta de las dos sociedades científicas inglesas, el 7 de noviembre, fue inevitable que naciera la leyenda del “repentinamente famoso Dr. Einstein”. Ese día comenzaría el siglo XX.

Un mundo impactado por el pavor de la guerra, saturado de noticias de batallas, con la incertidumbre de imperios devastados e imperios emergentes y ante un futuro incierto, vio en este hombre un símbolo de un nuevo orden cósmico. Hablaba en el idioma ignoto de las matemáticas, y cuando traducía al lenguaje común, en sus palabras había un algo misterioso: cuarta dimensión, espacio curvo, materia-energía, geometría no euclidiana.... Hablaba de las estrellas y del tiempo, que siempre han estado presente en los mitos; y satisfacía la doble necesidad de saber, y de no saber sino creer. Pero además fueron su pacifismo militante, su carácter distraído, su afición por la filosofía y el violín, una dosis de *vedettismo* y una prensa que descubría el arte de vender más, los detonantes de una gloria que lo llevó por toda Europa, de Tokio a Montevideo, de Shanghai a Río de Janeiro, y de Palestina a los Estados Unidos, que no lo abandonó hasta su muerte y que alternativamente lo divirtió o lo irritó, pero siempre lo desconcertó.

Un episodio racista

El auge del nazismo alemán en el período entre las dos guerras tocó de cerca en más de una oportunidad a la ciencia. En febrero de 1920, en el curso de una conferencia de Einstein en la Universidad de Berlín, se produjeron unos disturbios. Einstein declaró a la prensa que sintió una hostilidad que se podía interpretar como antisemitismo. En agosto de ese año en el teatro más grande de Berlín se realizó un encuentro para criticar la relatividad y la propaganda ‘de mal gusto’ que le hacía su autor. Einstein asistió y los tres días escribió en la prensa que la reacción hubiese sido diferente de él haber sido un alemán nacionalista con o sin esvástica, en lugar de un judío con convicciones liberales internacionales. Además insultó abiertamente al físico Philippe Lenard, nazi declarado, premio Nobel y adalid en la purificación de la ciencia alemana de cualquier contaminación de ciencia no aria.

Lenard descubrió el artículo de Soldner en 1921 y lo publicó nuevamente después de mutilarlo y anexarle un extenso prólogo donde reclamaba prioridad para Soldner en el cálculo de la desviación de la luz. Que el cálculo de Soldner no haya sido confirmado por las observaciones del eclipse era para Lenard un detalle irrelevante, lo importante era desacreditar a Einstein. Inmediatamente Max Von Laue dio cuenta (científica) de

Lenard. En 1932 Einstein abandonó a Alemania para siempre. Al año siguiente Hitler era nombrado canciller.

Las lentes gravitacionales

Mientras tanto las observaciones de los eclipses continuaron para intentar mejorar el valor de entre 10 y 20% de error experimental en las observaciones de 1919. Hubo nuevas observaciones: en 1922 en Australia, en 1929 en Sumatra, en 1936 en la Unión Soviética, en 1947 en Brasil, otra en 1952 y finalmente en Mauritania en el año 73. En ninguna de ellas, ni siquiera en la de Mauritania, en la que se disponía del poder de la tecnología sofisticada de los setenta, hubo notables mejoras en la precisión, incluso en alguna de ellas las observaciones contradecían la predicción de la relatividad. La expedición del 73 fue la última de su tipo porque los astrónomos pudieron contar con el perfeccionado radiotelescopio y los recientemente descubiertos cuasares. La antena parabólica del radiotelescopio es capaz de “ver” las ondas de radio provenientes de diversos astros. Los cuasares son los objetos más lejanos que conocemos; están a una distancia de unos 10.000 años luz, y si los podemos detectar es gracias a que emiten formidables cantidades de energía en forma de ondas de radio. Debido a su enorme distancia de nosotros, lucen mucho más puntuales que las estrellas, y con varios radiotelescopios sincronizados se puede lograr una focalización muy precisa de su posición. Además, la observación de los cuasares se puede hacer de día, de modo que no hay que esperar eclipses para tomar mediciones. Hoy, la predicción de la relatividad está confirmada con menos de un 1% de precisión.

En 1979, el año del centenario del nacimiento de Einstein un radiotelescopio detectó la imagen de dos cuasares muy cercanos entre sí. Sorpresivamente ambos cuasares tenían idénticas características individuales. La explicación de la coincidencia no se hizo esperar: se trataba de dos imágenes del mismo quasar cuyos rayos fueron enfocados por una galaxia interpuesta entre el quasar y nosotros y que actuó como una “lente gravitacional” produciendo imágenes múltiples. Posteriormente se han descubierto los “anillos de Einstein”, que ocurren cuando la galaxia que curva los rayos está exactamente sobre la línea entre el quasar y la Tierra.

Actualmente se pueden detectar pequeñas variaciones de las imágenes que a su vez brindan información acerca de la galaxia que hace de lente gravitacional. Ya la desviación de los rayos no se somete a verificación: ahora se le emplea como instrumento de exploración. La comprensión cabal de este ‘microenfoco gravitacional’ es en la actualidad un ‘área caliente’ de la astrofísica.

¿Por qué se impuso la relatividad?

Cuando Einstein recibió la noticia de que las observaciones del eclipse favorecían su teoría, se encontraba trabajando con una joven alumna, Ilse Rosenthal-Schneider. Ante la actitud impasible de Einstein que contrastaba con el júbilo que ella manifestaba, Ilse le preguntó que cuál hubiese sido su reacción en caso de que las observaciones le hubieran sido adversas; Einstein respondió: – Lo sentiría por el pobre Señor, la teoría es correcta –. Aparte de que se sabe que los resultados de las expediciones lo emocionaron con intensidad, la broma de Einstein refleja su convicción profunda en que la simplicidad conceptual, la elegancia, y la belleza de la teoría, garantizaban su armonía con la realidad. La relatividad predijo el desvío de los rayos de luz, pero además explicó una perversión en la órbita de Mercurio que había sido observada desde los tiempos de Leverrier, a mediados del siglo XIX, y que la teoría de Newton no podía explicar. Einstein contó cómo “sintió palpitaciones” al darse cuenta que sin proponérselo, su teoría explicaba la anomalía. Curiosamente esta “retrodicción” no jugó un papel importante en el proceso de validación de la teoría, ni siquiera la confirmación relativamente pobre de la predicción del comportamiento de la luz a pesar del vasto impacto publicitario que tuvo. De hecho, grandes científicos como Hilbert, Lorentz, Born, Sommerfeld, Eddington, Langevin y De Sitter, ya la habían aceptado antes de 1919. Planck nominó a Einstein para el Nóbel en 1919, cuatro meses antes de los resultados del eclipse, por su teoría de gravitación. ¿Cómo explicar que la relatividad general prendara en el interés de los físicos, que consideraran valioso trabajar en ella, contrastarla con los experimentos, enseñarla a las generaciones siguientes? La única respuesta posible invoca la majestad formal de la teoría. La magia de su estructura y su simplicidad conceptual, explica que la teoría se impusiera a pesar de la débil evidencia experimental a su favor. Hoy, a 85 años de la creación del mito, la relatividad ha superado con éxito todas las confrontaciones con la realidad, y es hasta ahora nuestra mejor teoría de la gravitación.

Agujeros Negros

El nombre y la idea de agujero negro forma parte ya de la cultura mediática en nuestra globalizada civilización, por su enorme capacidad para generar especulaciones. Mucho menos conocido es que el concepto de agujero negro es netamente relativista. La relatividad contempla la posibilidad de que en una región del espaciotiempo la luz quede presa de la curvatura y nada, ni materia ni radiación

pueda salir de esa región al exterior y eso es en esencia un agujero negro. Es el triunfo final de la atracción gravitacional, sin nada que pueda oponérsele. La descripción teórica de los agujeros negros es relativamente sencilla porque en ella lo único relevante es la geometría. Los efectos relativista son enormes y esconden en su interior una singularidad del espaciotiempo, que no sabemos descifrar con la física disponible actualmente; pero los mecanismos de formación del agujero, pueden ser muy complejos.

Luego de un largo período de escepticismo acerca de la existencia de agujeros negros (Einstein no creía en ellos), actualmente se piensa que puedan ser objetos muy comunes en el universo. Nuestra propia galaxia parece albergar en su centro un agujero negro con una masa de dos millones de veces la masa del Sol, y se piensa que estos agujeros negros supermasivos, con masas entre un millón y un millardo de masas solares podrían ser habitantes de casi todos o todos los centros de las galaxias. Hasta ahora ellos son la explicación más plausible para explicar las descomunales energías emitidas por los cuasares: el material a su alrededor, polvo y gas, es arrastrado hacia el agujero negro por su campo gravitatorio, formándose un disco de acrecimiento. En él, la materia se calienta por fricción a enormes temperaturas convirtiendo a quasar en un potente emisor de ondas de radio y rayos X, alcanzando luminosidades cientos de veces mayores que los de una galaxia normal. Eventualmente, luego de que el agujero negro ha barrido la materia a su alrededor, el quasar desaparece dejando un agujero negro inocuo, y quieto como los que aparentemente han se están observando en los centros de muchas galaxias modernas.

También las evidencias apuntan a la existencia de agujeros negros de masas entre tres y unas veinte masas solares, que se formarían en una supernova después de que la estrella ha consumido su combustible. Telescopios como el Observatorio de rayos X Chandra, o el telescopio espacial Hubble, observan cotidianamente fuentes muy poderosas de rayos X. Los astrofísicos teóricos intentan construir modelos detallados en los que se distinga de la radiación proveniente de estrellas de neutrones. El consenso es que cantidades tan grandes de materia concentrada en regiones pequeñas del espacio y campos gravitacionales tan fuertes no pueden deberse a otra cosa que no sean agujeros negros. Establecer definitivamente su existencia significará un gran triunfo de la relatividad general.

La expansión del Universo

Hay otras predicciones y otros éxitos de la relatividad, que no mencionaremos por falta de espaciotiempo. Pero una de ellas, por el impacto que produce y por sus consecuencias, no la podemos dejar de lado, y es la predicción de acuerdo con la cual

a escala suficientemente grande, el espacio se expande: es la expansión del universo, tema al cual dedicaremos el tercer y último capítulo.