

BRK-008 · Poner a prueba la gravedad: de 1915 a 1975

BRK · Rupturas conceptuales

Juan Segurola · All Rights Reserved

Una teoría puede dar cabida a una observación sin ser la única capaz de dar cabida a ella. Esta distinción pasó a ser central para la física gravitatoria durante las décadas posteriores a la aparición de la relatividad general. El cambio importante no fue simplemente acumular confirmaciones impresionantes. Fue construir experimentos y un lenguaje matemático común que permitieran discriminar entre explicaciones coincidentes en buena parte de la evidencia conocida.

Entre 1915 y 1975, la gravedad adquirió una pregunta experimental más exigente: ¿qué característica de una teoría gravitatoria restringe realmente esta medición? Una órbita planetaria, una frecuencia espectral y el tiempo de recorrido de una señal de radar no ponen a prueba exactamente la misma afirmación. Sus diferencias son útiles. Evitan confundir el acuerdo en un contexto con una confirmación ilimitada en todos ellos.

1. Una antigua discrepancia y una nueva predicción

El perihelio de Mercurio, la dirección de su máxima aproximación al Sol, avanza. La mayor parte de ese movimiento ya podía explicarse mediante las perturbaciones planetarias newtonianas. La discrepancia restante, de unos 43 segundos de arco por siglo, se convirtió en una aplicación exitosa de la teoría de Einstein de 1915. Explicaba un problema existente, en vez de predecir un fenómeno que nadie hubiera advertido. [1]

La distinción no hace científicamente débil el resultado. Una teoría con parámetros restringidos de manera independiente puede explicar una anomalía conocida sin haber sido ajustada libremente para reproducirla. Pero su función histórica difiere de la de una medición diseñada después de formular una predicción. Estas dos formas de evidencia no deben fundirse en una sola historia de sorpresas repetidas.

La desviación de la luz estelar cerca del Sol ofrecía una comprobación distinta. Las mediciones del eclipse de 1919 compararon posiciones estelares aparentes próximas al Sol eclipsado con posiciones de referencia. El resultado dependía de la medición fotográfica, la estabilidad instrumental y el tratamiento de la incertidumbre. Era evidencia sobre el comportamiento de la luz en el campo gravitatorio solar, no una fotografía de la propia curvatura del espacio-tiempo. [1]

La relatividad especial y la general también deben mantenerse separadas. La primera describe la física local no gravitatoria en sistemas de referencia inerciales; la segunda proporciona una explicación dinámica de la gravitación. La evidencia de dilatación temporal en un reloj en movimiento no permite, por sí sola, elegir la relatividad general frente a todas las teorías gravitatorias rivales.

2. Llevar los desplazamientos gravitatorios de frecuencia al laboratorio

El experimento de Pound y Rebka de 1960 utilizó absorción resonante de rayos gamma para poner a prueba un desplazamiento gravitatorio de frecuencia a lo largo de una separación vertical en un laboratorio terrestre. Un desplazamiento Doppler controlado permitía comparar un efecto gravitatorio

extremadamente pequeño con otro ajustable experimentalmente. [2]

En la aproximación de campo débil, la magnitud de la diferencia fraccionaria de frecuencia es aproximadamente gh/c^2 . Aquí g es la aceleración gravitatoria, h la separación en altura y c la velocidad de la luz. El signo depende de dónde se sitúen el emisor y el receptor. Un fotón recibido a mayor altura en el campo gravitatorio presenta desplazamiento al rojo respecto a la transición local correspondiente.

Para una separación ilustrativa de 20 metros, tomando $g = 9,8$ metros por segundo al cuadrado y $c = 300$ millones de metros por segundo, la magnitud es aproximadamente $2,18 \times 10^{-15}$. Estos valores redondeados ilustran la escala; no reconstruyen las mediciones del experimento. El reto experimental consiste en separar ese desplazamiento del movimiento térmico, la vibración y otros efectos sobre la resonancia.

La medición pone a prueba una relación entre el potencial gravitatorio y la frecuencia de los relojes. Su interpretación no exige tratar el fotón como un pequeño proyectil newtoniano con una masa en reposo ordinaria. Observar con éxito este efecto tampoco establece de manera única todas las ecuaciones de campo de la relatividad general. Varias teorías métricas lo comparten. Un resultado preciso puede ser, por tanto, decisivo para una proposición y dejar otras sin resolver.

3. Medir el tiempo que tarda una señal

En 1964, Irwin Shapiro propuso otra comprobación: una señal de radar que pasara cerca del Sol debería tardar más en completar su recorrido que lo calculado sin la contribución gravitatoria relativista. El observable es un retardo de ida y vuelta, inferido

mediante un modelo de las posiciones y el movimiento de los cuerpos implicados. [3]

Esto cambia lo que debe controlarse. Una medición de desviación compara direcciones; un experimento de determinación de distancias compara tiempos. Pueden importar el retardo instrumental, los parámetros orbitales y la propagación a través del material a lo largo de la trayectoria. Medir mientras cambia la geometría ayuda a distinguir una señal gravitatoria de un desfase temporal fijo.

Resulta tentador explicar el retardo predicho diciendo que la luz simplemente se frena cerca del Sol. Esa frase confunde las descripciones en coordenadas con la medición local. En relatividad general, un observador local en caída libre mide la misma velocidad de la luz en el vacío. El tiempo total de recorrido se refiere a una trayectoria a través de una geometría gravitatoria y a los relojes utilizados para especificarlo. Una velocidad en coordenadas puede cambiar sin introducir una violación de la relatividad especial medida localmente.

4. Las alternativas pasan a formar parte del diseño experimental

En la década de 1960 y a comienzos de la de 1970, los métodos posnewtonianos parametrizados permitían comparar diversas teorías gravitatorias de campo débil mediante parámetros comunes. En vez de preguntar solo si una observación coincidía con Einstein, los investigadores podían preguntar qué combinaciones de parámetros restringía. La propagación de la luz y la dinámica orbital aportaban combinaciones diferentes. [1]

Consideremos la lógica de dos mediciones hipotéticas. Una restringe una combinación de dos parámetros desconocidos; la otra restringe una combinación distinta. Por separado, cada una

puede admitir muchas teorías. Juntas pueden excluir alternativas que sobreviven a cada comprobación por separado. Esto no es un conjunto de datos históricos ni un ajuste numérico. Explica por qué un programa coordinado aporta más información que una lista de éxitos aislados.

La comparación está condicionada por el marco. Una teoría que quede fuera de sus supuestos puede exigir otra descripción experimental. Los parámetros no representan automáticamente cualquier desviación imaginable respecto a la relatividad general. Su valor reside en hacer calculable y comparable una clase amplia y declarada de alternativas.

5. Lo que estableció el periodo y lo que no

El periodo que termina en 1975 no debe apropiarse de éxitos posteriores para aparentar una evidencia más sólida. En particular, la medición posterior del decaimiento orbital de un pulsar binario y la detección directa de ondas gravitatorias, mucho más tardía, no pertenecen a sus comprobaciones completadas. La transformación pertinente ya había ocurrido: se diseñaban experimentos cada vez más precisos para distinguir posibilidades gravitatorias.

Tampoco se pasó de ninguna evidencia a una evidencia perfecta. Las observaciones iniciales podían aportar información pese a una incertidumbre considerable. Los instrumentos posteriores mejoraron algunos controles e introdujeron dependencias diferentes. El desarrollo histórico se entiende mejor a través de los cambios en los observables y los presupuestos de error que como una ceremonia en la que un experimento célebre acabó definitivamente con las dudas.

El resultado fue un nuevo criterio de explicación. Una teoría gravitatoria exitosa debía superar comprobaciones que

examinaran aspectos diferentes de su estructura, con alternativas y supuestos de medición explícitos. Ese criterio reforzó la relatividad general y conservó preguntas que no podía resolver, entre ellas la relación entre la gravitación y la física cuántica.

Lectura relacionada

El artículo BRK 009, «Los fundamentos cuánticos pasan a ser distinguibles experimentalmente», examina otra transformación del desacuerdo teórico en alternativas experimentales cuantitativas.

Referencias

- [1] Will, C. M. "The Confrontation between General Relativity and Experiment." *Living Reviews in Relativity* 17, 4 (2014), introducción y secciones sobre desplazamiento al rojo y comprobaciones posnewtonianas. <https://doi.org/10.12942/lrr-2014-4>
- [2] Pound, R. V., y Rebka, G. A., Jr. "Apparent Weight of Photons." *Physical Review Letters* 4, 337–341 (1960). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.4.337>
- [3] Shapiro, I. I. "Fourth Test of General Relativity." *Physical Review Letters* 13, 789–791 (1964). <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.13.789>