

Gravitación

(Bosquejo y algunos fenómenos recientemente estudiados)

"... with the special purpose of testing a new theory of gravitation put forward by a mathematician named Einstein".

LIGHT CAUGHT BENDING: A discovery like Newton's. *The Daily Mail*, London, Friday, November 7, 1919.

ANTONIO SARMIENTO*

INTRODUCCION

Desde tiempos inmemoriales filósofos y científicos por igual han tratado de entender a la gravitación. Sus estudios han conducido a lo que se considera en nuestros días como la oveja negra en la familia de interacciones básicas de la naturaleza: la gravedad, ya que no sólo se niega a someterse a los esquemas para la unificación de las interacciones, de por sí complejos, sino que parece estar en serio conflicto con su pariente más reciente, la mecánica cuántica.

Los dos nombres más íntimamente relacionados con la gravitación son los de Newton y Einstein. Este último, aunque en un contexto distinto, ha vuelto sobre la proposición de Platón: Dios siempre geometriza.

De los cuatro artículos que Einstein publicó en 1905, el tercero contenía un análisis sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento que después recibió el nombre de teoría especial de la relatividad. La idea de generalizar esta teoría y extender la universalidad de las leyes de la naturaleza a cualquier marco de referencia (incluyendo los acelerados) lo condujo a lo que actualmente parece ser la mejor teoría de gravitación: la teoría general de la relatividad o relatividad general (RG) como comúnmente se nombra. De entre las diversas teorías gravitacionales que hoy día describen congruentemente lo observado, la RG se distingue por ser la más simple, simétrica y estética.

Relatividad General

Al inicio de la segunda década de

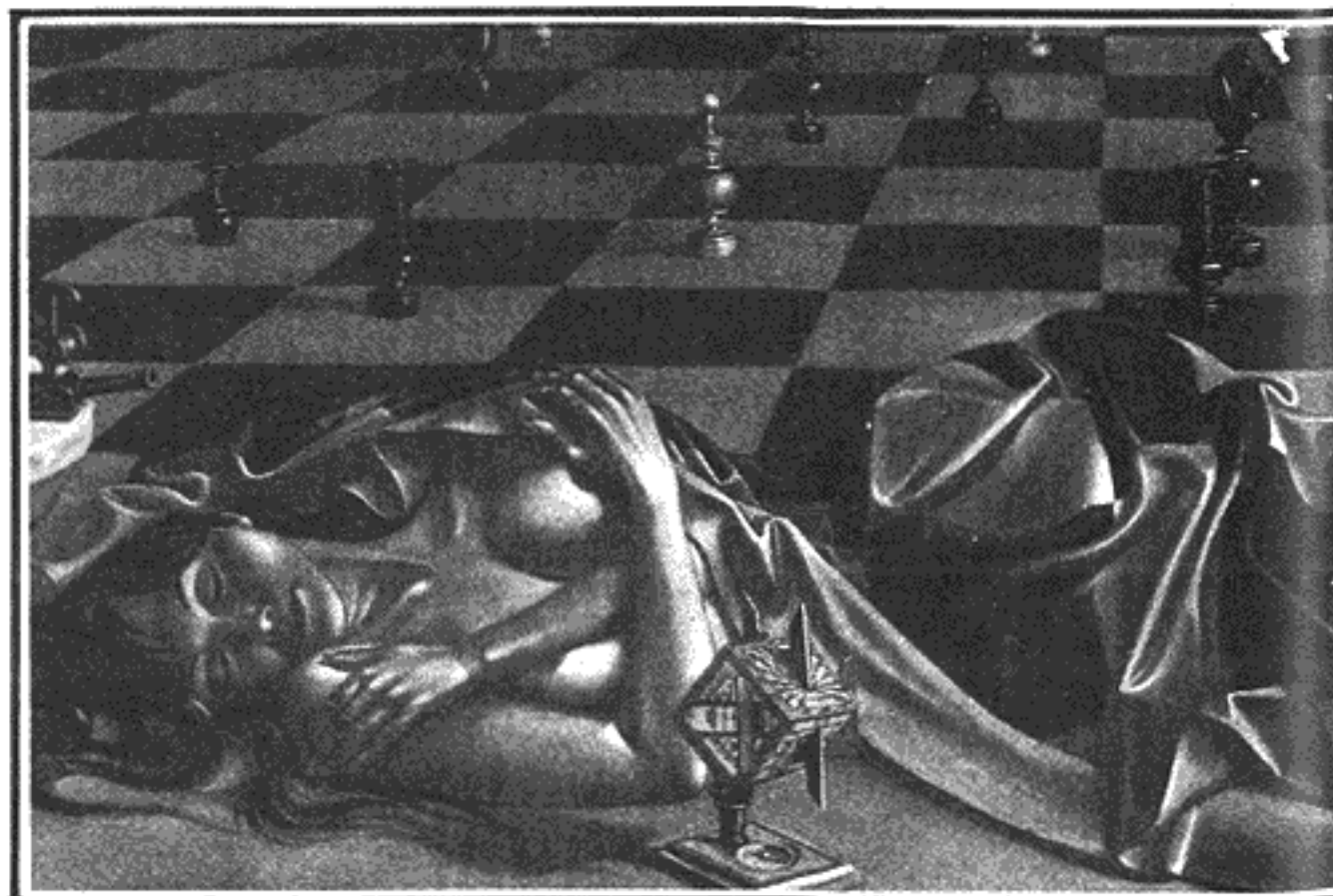
este siglo Einstein trabajó durante dos años, en compañía de Marcel Grossmann, utilizando las ideas propuestas por Bateman en un tratamiento más profundo de la gravitación. Un paso importante fue abandonar la creencia de que un campo gravitacional puede especificarse a través de una sola función potencial escalar e introducir en su lugar diez funciones (coeficientes métricos) que no sólo especifican la fuerza gravitacional, sino que además determinan las escalas de distancia y de tiempo. La gravitación se reduce entonces a geometría. Las diversas fuerzas de la naturaleza (incluida la gravitación) habían hasta entonces actuado en el espacio, un escenario cuyas propiedades eran descritas por la Geometría Euclídea. En la nueva teoría, la gravitación abandonaba su papel en el escenario y se convertía en

parte de la estructura del mismo. El hecho de que la relatividad general haga uso de diez funciones "potenciales" para especificar la fuerza gravitacional y determinar las escalas de distancia y tiempo, la convierte en integrante del grupo de teorías conocidas como teorías métricas en las que, en términos generales, la gravedad puede ser tratada como un sinónimo de la curvatura del espacio-tiempo (ver recuadro pág. 22).

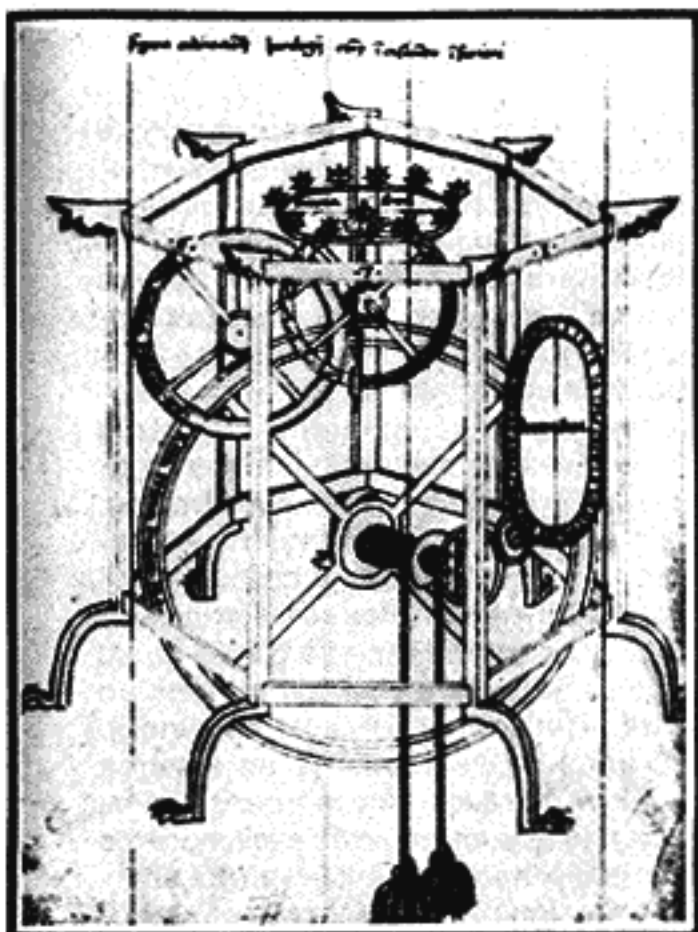
Posteriormente Einstein corrigió en una serie de artículos cortos un defecto de la teoría: la carencia de un conjunto de ecuaciones que jugasen el mismo papel que la ecuación de Poisson juega en la teoría Newtoniana.

Ya que el describir en estas líneas la evolución de la actividad científica en

"En la relatividad general la gravitación abandona su papel en el escenario y pasa a formar parte del mismo."



* Profesor de la Facultad de Ciencias e Investigador del Instituto de Astronomía, UNAM.



La medición del tiempo ha estado asociada al estudio del movimiento de los cuerpos celestes. Actualmente existe el problema de hacer coincidir el tiempo de efemérides con el medido por los relojes atómicos.

el campo de la gravitación queda fuera del tema central de este trabajo, se menciona únicamente que la forma actual de la teoría de la Relatividad General es el resultado del trabajo de varios científicos (físicos, astrónomos y matemáticos esencialmente) alrededor de la idea original de Einstein y de su propio trabajo, idea que surgió de la necesidad de expresar las leyes de la naturaleza de una manera universal, es decir, válida para cualquier marco de referencia, acelerado o no con respecto al observador

Evidencia Observacional y Experimental

Las pruebas clásicas a las que han sido sometidas las teorías métricas de gravitación, todas ellas en el sistema solar, constituyen en la actualidad parte del contenido de la gran mayoría de libros de texto sobre el tema. De manera que en su lugar —además de mencionar que ninguna de dichas pruebas ha proporcionado resultados que con la precisión de hoy día, difieran de los predichos por la RG— se enumerarán algunos problemas que aún esperan recibir el tratamiento que permita conocer sus posibles consecuencias en cuanto a la veracidad de la interpretación de los resultados experimentales. Dichos problemas son:

- i) La asfericidad solar origina un avance en los perihelios plane-

tarios proporcional al momento cuadrupolar del astro. Este momento depende a su vez de la estructura solar interna: estando directamente relacionado con la rotación influye sobre la determinación del momento angular solar y en el cálculo de la profundidad en la corona a la cual el viento solar cambia la rotación superficial mediante la expulsión de momento angular. Debido a la considerable cantidad de física solar compleja que se involucra al relacionar las observaciones sobre el achatamiento solar con el valor del momento cuadrupolar, el problema no puede considerarse como resuelto y mucho menos como algo que facilite la interpretación de los resultados.

- ii) En vista de la exactitud actual para la determinación del tiempo, es interesante notar que la coordenada temporal en la Relatividad General se mide desde el centro del Sol. Se debe entonces transformar el tiempo medido en las observaciones al centro del sol para poder obtener el tiempo de efemérides (tiempo definido por las leyes dinámicas a diferencia del tiempo medio definido por el tránsito de las estrellas fijas). De esta manera, se identificará la coordenada temporal con el tiempo de efemérides y al tiempo propio con el medido por los relojes atómicos. Se han logrado medir variaciones entre las indicaciones de los estándares atómicos y las del tiempo de efemérides de 3.4×10^{-3} segundos en un año, y deberían tomarse en cuenta.

- iii) El marco de referencia inercial para el sistema solar queda determinado en parte, mediante la selección del marco respecto al cual los residuos del promedio de los movimientos propios de las estrellas son mínimos. Este marco y el determinado dinámicamente por los movimientos planetarios no son separables hoy día (si el marco adoptado estuviese rotando respecto de un marco dinámico aún desconocido, se producirían movimientos seculares de los perihelios y los nodos de las órbitas planetarias).

Afortunadamente existen otros fenómenos fuera del sistema solar que, si bien no es posible utilizarlos en experimentación, nos permiten la corro-

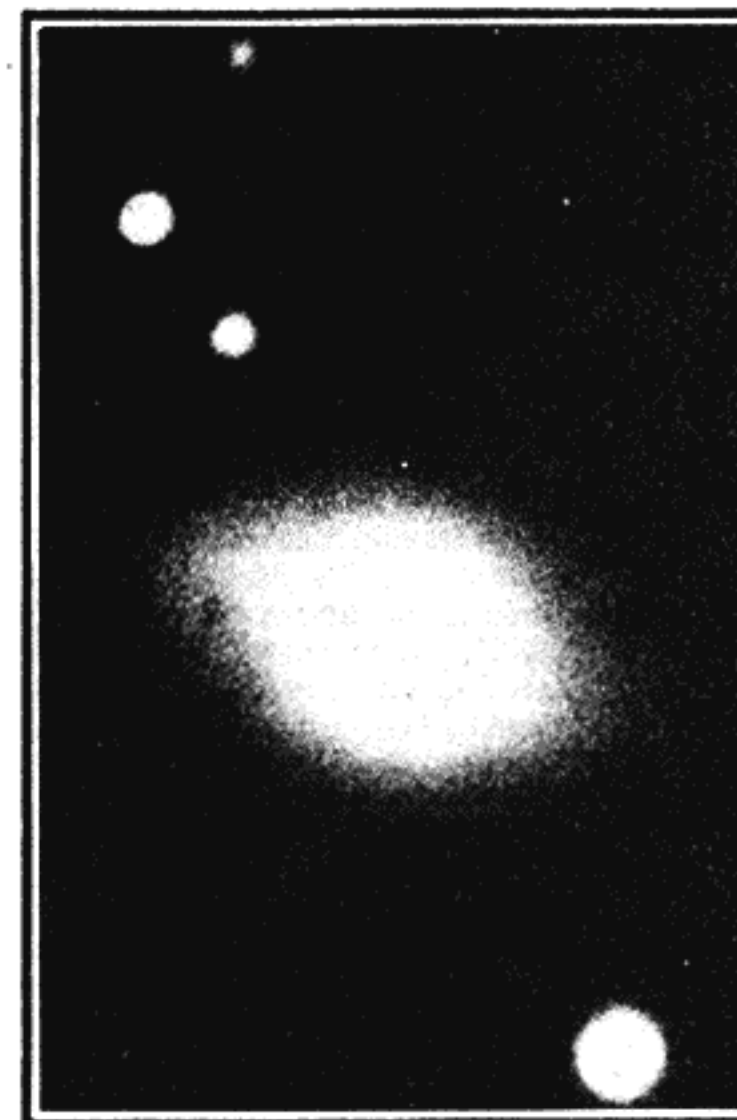
boración de las predicciones teóricas. La descripción de dichos fenómenos constituye el tema de la siguiente sección.

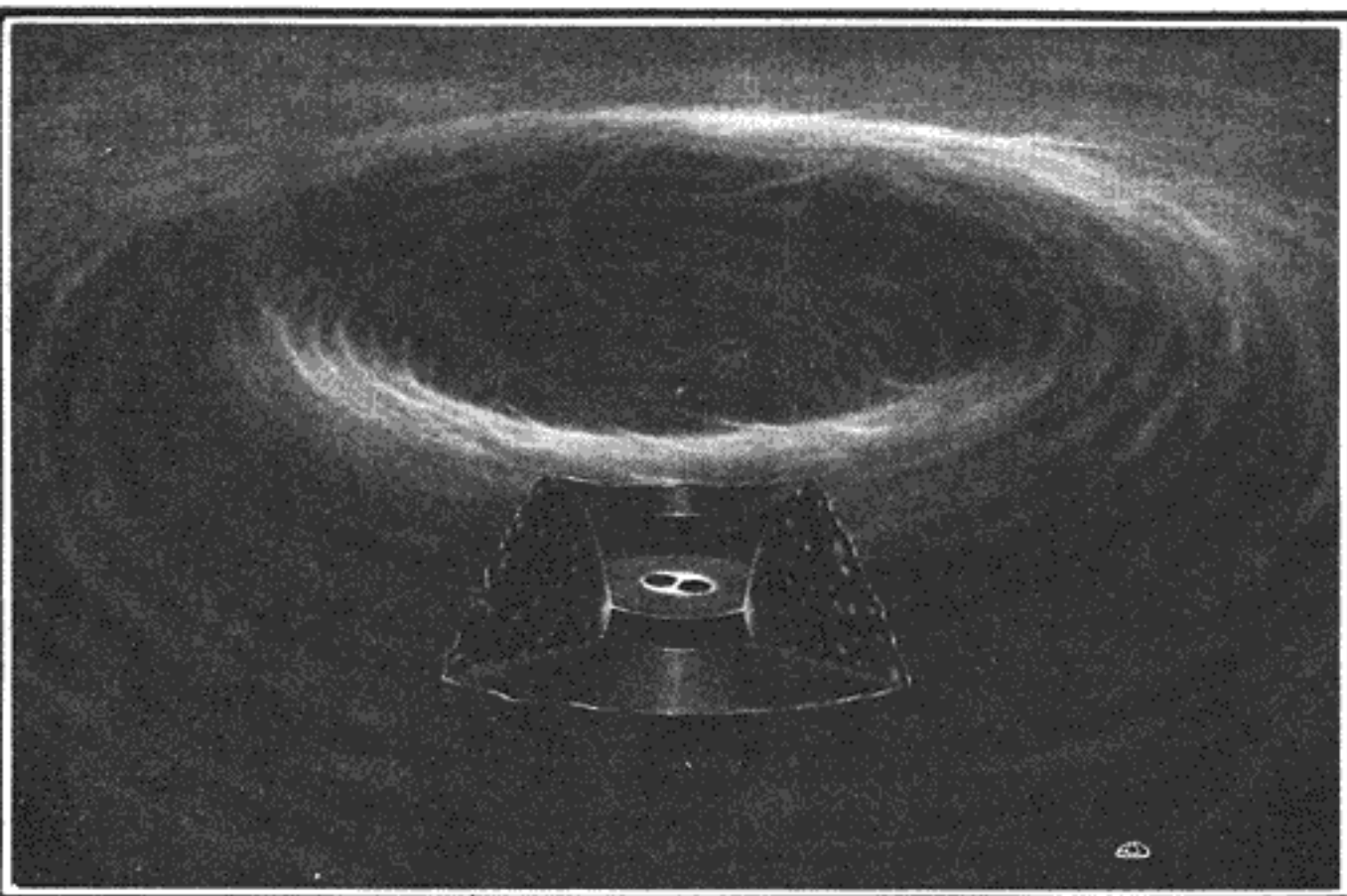
Nuevos fenómenos Hoyos negros, pulsares binarios y lentes gravitacionales

Hoyos negros

Poco después de que Einstein completara la formulación de la teoría de la Relatividad General en 1916, Karl Schwarzschild encontró la solución a las ecuaciones de campo representando la atracción gravitacional en el exterior de una distribución esférica de masa. Dicha solución presenta una singularidad matemática que en un principio se consideró solamente como eso: una imperfección debida a las idealizaciones del modelo. Más de 20 años después, los estudios en evolución estelar mostraron que, como producto final del colapso gravitacional de una estrella masiva en extinción, se podrían obtener centros de atracción gravitacional pura una vez que la materia se "esfumase" en el colapso. Aquellas singularidades de la teoría encontraban así una posibilidad a su

En esta fotografía el objeto de mayor tamaño es una galaxia, el primer objeto arriba a su izquierda es un cuasar que se aleja de nosotros a 123 000 kilómetros por segundo.





Dibujo que representa el disco de acreción de un hoyo negro. Las partículas en su caída emitirían rayos X.

existencia: los llamados hoyos negros que, debido a poseer una atracción gravitacional tan fuerte, no sólo representaban un peligro de "desaparición por caída" de la materia circundante, sino que además no permitían que escapase ningún tipo de energía (incluida la electromagnética) que pudiese dar información sobre ellos.

Hasta 1963 Kerr descubrió la solución análoga a la de Schwarzschild pero para un objeto esférico en rotación. Este fue un paso importante ya que la gran mayoría de las estrellas parecen encontrarse en este estado y porque, además, se espera que la tasa de rotación aumente con el colapso. Los teoremas de unicidad para los hoyos negros rotantes no se hicieron esperar y se llegó a la conclusión de que, aún cuando el colapso de una estrella girando pudiese ser algo muy complicado, el resultado final sería relativamente simple, independiente de los detalles del colapso y quedaría completamente especificado por tres números: la masa, el espín y la carga.

La formación de hoyos negros depende de las alternativas posibles para el final de las estrellas. Para una estrella de aproximadamente una masa solar existen sólo dos alternativas: la primera conocida como enana blanca, es la configuración final de la estrella en la que la fuerza que mantiene el balance y evita que continúe el colapso, es la misma fuerza que mantiene el balance en los átomos (principio de exclusión). Sin embargo, cuando la

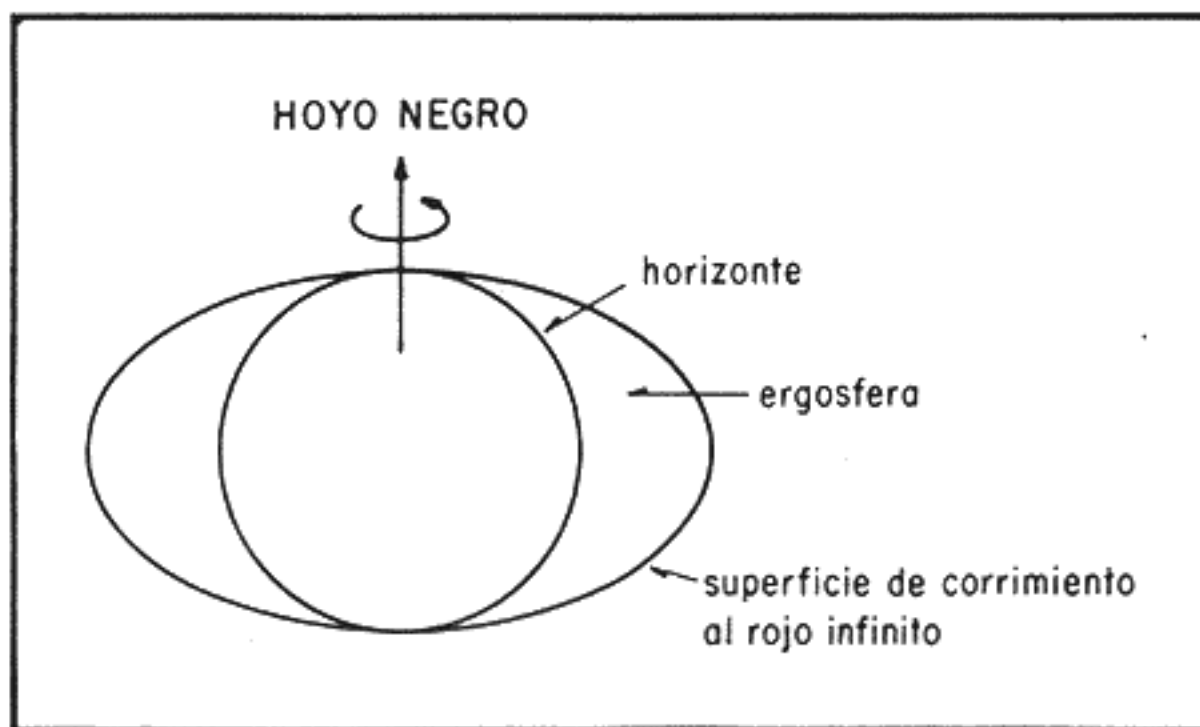
masa de la estrella es mayor a una masa crítica, conocida como la masa de Chandrasekhar y del orden de 1.2 masas solares, dichas fuerzas ya no pueden mantener el equilibrio. La segunda configuración estable, llamada estrella de neutrones, se logra mediante el equilibrio entre la fuerza gravitacional y las fuerzas que soportan los núcleos atómicos (fuerzas nucleares). Debido al poco conocimiento sobre cómo actúan estas fuerzas cuando las densidades son muy altas, el límite a la masa que puede formar una estrella de neutrones oscila entre 1 y 3 veces la masa del sol. Las enanas blancas han sido observadas desde hace muchos años, no así las estrellas de neutrones que sólo recientemente han sido

detectadas en pulsares y fuentes binarias de rayos X.

Al continuar con esta secuencia, la teoría predice que una estrella de más de 3 masas solares, que no pierda masa durante el colapso gravitacional, no tiene otra alternativa que convertirse en un hoyo negro. Ya que existen muchas estrellas que superan dicho límite, y debido a que las estrellas evolucionan más rápidamente mientras mayor sea su masa, deberíamos esperar un gran número de hoyos negros; sin embargo, como dichos hoyos negros son esencialmente oscuros, sólo pueden mostrarnos su existencia de una manera indirecta: a través de su fuerte influencia sobre la materia en sus alrededores. El sistema binario Cygnus X-1 representa un sistema emisor de rayos X cuya intensidad es tan alta que, de acuerdo a los modelos actuales, necesita una fuente de energía tan potente y compacta que probablemente, sólo pueda ser proporcionada por la atracción gravitacional de un hoyo negro integrado en el sistema. El debate sobre si los sistemas similares a Cygnus X-1 contienen en realidad hoyos negros ó no, se encuentra todavía abierto.

Una de las características primordiales de los hoyos negros predichas por la teoría, es la existencia de una superficie llamada horizonte que envuelve completamente a la materia colapsada y que es permeable sólo de afuera hacia adentro: luz y materia pueden cruzarla al caer en el hoyo pero nada puede atravesarla en el sentido opuesto. El radio de dicha superficie para un hoyo negro estático recibe el nombre de radio de Schwarzschild y queda completamente determinado por la masa M de dicho hoyo. Aún

Fig. 1 Hoyo negro rotante (Kerr). Tomado de P. C. Peters, 1974.



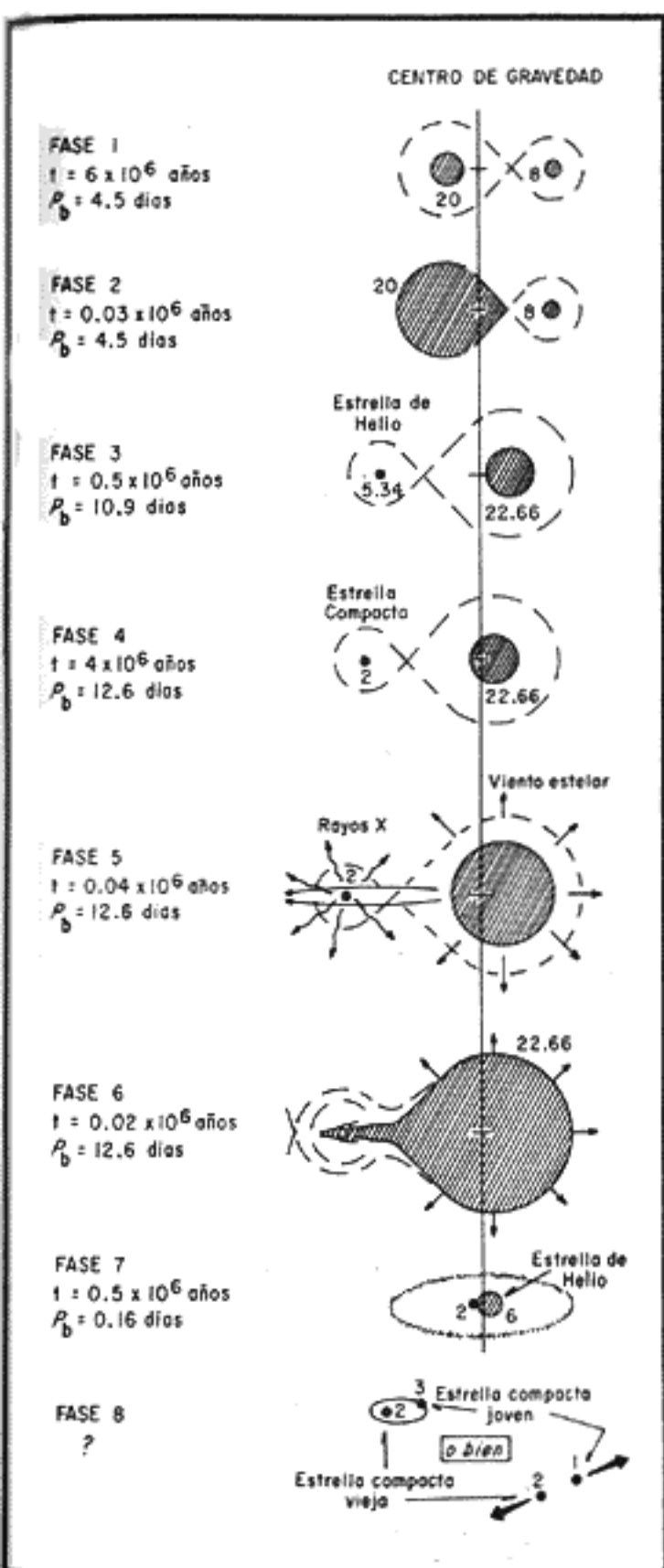


Fig. 2 Evolución de un sistema binario cercano hipotético. Las masas iniciales de las estrellas son 8 y 20 masas solares. Cada fase se encuentra etiquetada con su duración aproximada (t) y el período de la órbita binaria (P_b). Los números en la cercanía de las estrellas indican la masa de las mismas en unidades de la masa solar (M_{\odot}). El escenario empieza con dos estrellas de la secuencia principal con masas de 8 y 20 M_{\odot} la estrella más masiva evoluciona hasta llenar su lóbulo de Roche y comienza a depositar masa sobre su compañera. En 30 000 años aproximadamente, cerca de 15 M_{\odot} de material son transferidas a la compañera, el resultado son una estrella de helio o Wolf-Rayet de 5 M_{\odot} y una estrella de secuencia principal de 23 M_{\odot} ; la conservación del momento angular ha incrementado el período orbital. A continuación la estrella de Helio explota en supernova eyectando 3 M_{\odot} de gas y dando origen a un objeto compacto de 2 M_{\odot} , probablemente una estrella de neutrones; el período orbital se ha incrementado nuevamente. La estrella de 23 M_{\odot} continúa evolucionando hasta convertirse en una supergigante azul con un fuerte viento solar que al ser atrapado por el objeto compacto origina una poderosa fuente de rayos X. Al llenar el lóbulo de Roche la estrella supergigante, se inicia una segunda fase de transferencia de material que extingue la fuente de rayos X. Una fracción del material 17 M_{\odot} , se pierde y al final del proceso el sistema consiste en un objeto compacto de 2 M_{\odot} y una nueva estrella de helio de espacio 6 M_{\odot} , ambas en una órbita cercana. Finalmente, cuando la estrella de helio evoluciona en una supernova, se origina un sistema de dos objetos compactos en una órbita cercana o bien, dos objetos compactos desbocados alejándose entre sí. De la fase 4 en adelante el sistema contiene un objeto potencialmente observable como radio-pulsar y al alcanzarse la fase 8, uno o ambos objetos podrían ser detectados como radio-pulsares. Tomado de E.P.J. van den Heuvel, Enrico Fermi Summer School on Physics and Astrophysics of Neutron Stars and Black Holes, Varenna, Italy, 1975.

cuando la teoría permite cualquier valor para M , algunos efectos cuánticos parecen sugerir que el valor mínimo permisible es de aproximadamente 10^{-8} kgs. Este valor resulta astronómicamente irrelevante ya que como hemos visto, las estrellas cuya masa es inferior a tres veces la del sol ($\approx 6 \times 10^{30}$ kg) evolucionarán hacia enanas blancas o estrellas de neutrones. Un hoyo negro de cinco masas solares tendría un radio de aproximadamente 20 km. Hay quienes piensan que hoyos negros de 10^6 a 10^8 masas solares podrían constituir los centros de algunas galaxias, incluyendo la Vía Láctea, que bien se podrían haber formado del colapso de una estrella masiva, o bien del agrupamiento de un número grande de hoyos negros con masas más mo-

destas. La densidad requerida para formar dichos objetos es cercana a la de las densidades terrestres ordinarias.

El horizonte también constituye una superficie de infinito corrimiento hacia el rojo, es decir, la luz emitida ligeramente fuera del horizonte, le llegará a un observador distante con una frecuencia (y consecuentemente una energía) mucho menor a aquella con la que fue emitida. De la misma manera, la materia cayendo al hoyo negro tardará un tiempo infinito para dicho observador y, la luz proveniente de ella se irá enrojeciendo hasta la obscuridad a medida que el proceso de caída se efectúa. Sin embargo, para un observador situado sobre la materia que cae, el tiempo que durase el proceso

sería finito y no experimentaría algo más extraño que las conocidas fuerzas gravitacionales de marea. La diferencia es que una vez adentro, el observador se encuentra atrapado y junto con la demás materia sería, de acuerdo a la teoría, triturado hasta que se alcanzase una densidad infinita (el proceso sería consoladoramente rápido).

Para los hoyos negros rotantes la superficie de infinito corrimiento hacia el rojo se encuentra, debido a la rotación y excepto en los polos, fuera del horizonte. La región entre ambas superficies, conocida como ergósfera, contiene trayectorias de partículas cuya energía es negativa respecto a los observadores en el exterior. Roger Penrose ha sugerido la posibilidad del uso de estas trayectorias para obtener energía, ya que no sólo se recuperaría mayor cantidad de energía que la de la masa en reposo que se enviase hacia el hoyo negro rotante, sino que, al disminuir la rotación se podría disponer de la energía liberada en el frenado. La radiación enviada hacia un hoyo negro sería análogamente amplificada. Fig. 1

De acuerdo a la teoría, las soluciones que significan hoyos negros son totalmente estables y existirán por siempre, quizá sólo aumentando de tamaño al acumular materia. Sin embargo, Steven Hawking incorporando efectos cuánticos, ha llegado a la conclusión de que los hoyos negros deberían radiar en proporción inversa a su cantidad de masa.

Sistemas Binarios con un Pulsar

Los modelos más recientes para el origen de estrellas cuya emisión pulsa con una periodicidad asombrosamente estable en el espacio (pulsares), explican su formación a través de explosiones de estrellas masivas en lo que se conoce con el nombre de Supernovas. Este posible origen explica además, el hecho observacional de que los pulsares en general, sean objetos solitarios (a pesar de que casi la mitad de objetos estelares sean miembros de sistemas binarios o múltiples). Un sistema en el que existiese un pulsar significaría que dicho sistema ya ha sufrido una explosión que le dió origen y que muy probablemente ha alejado sustancialmente a la(s) otra(s) componente(s). Entonces la probabilidad de que dicho tipo de sistemas sobreviva a una segunda explosión que diese origen a un segundo pulsar, es extremadamente baja. Fig. 2

La importancia astronómica de sistemas dobles reside en el hecho de

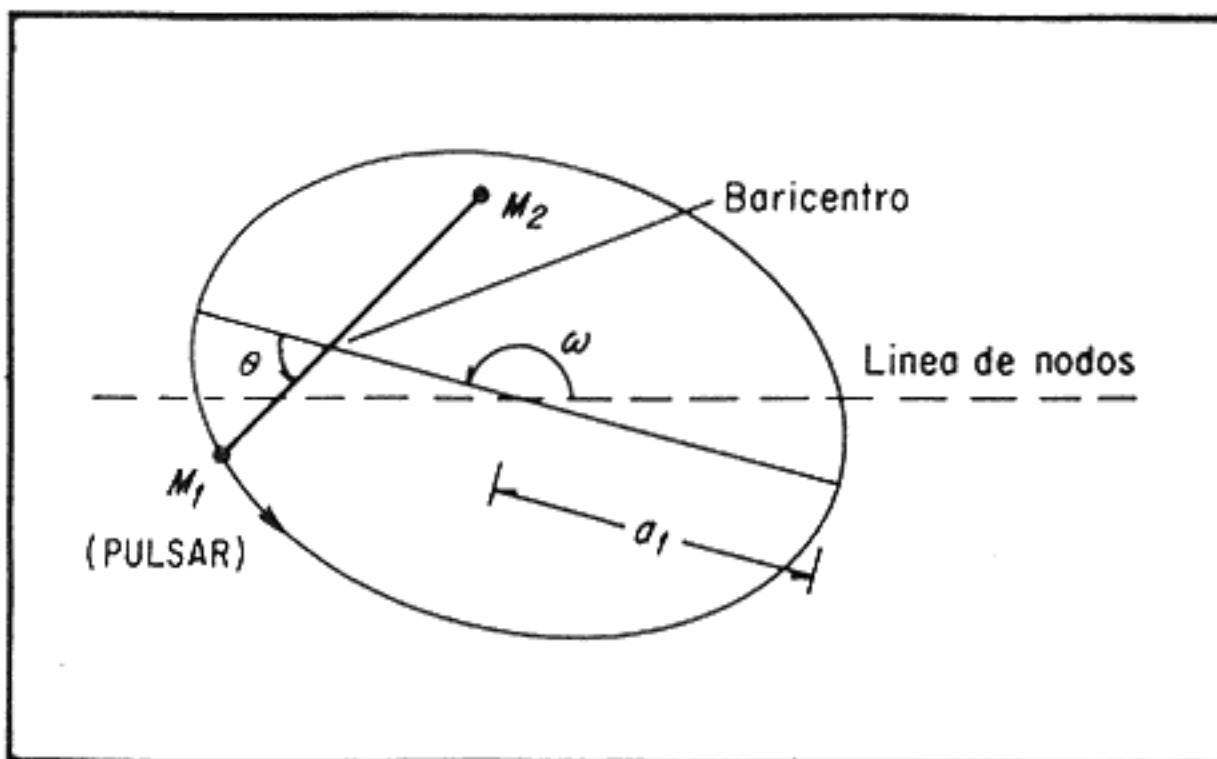


Fig. 3 Diagrama de la órbita del pulsar PSR 1913-16 visto de cara. La línea de nodos es la intersección del plano de la órbita y el plano celeste y el ángulo de inclinación i es el ángulo entre dichos planos. ω es la longitud del periastro y a_1 el semieje mayor de la órbita. Tomado de R. N. Manchester & J. H. Taylor, 1977.

que la observación de las interacciones gravitacionales mutuas entre las componentes, constituye el único método para obtener valores para las masas de las componentes del sistema. Un sistema que además cuente con un estándar temporal estable y sumamente rápido, como la existencia de un pulsar en el sistema, representa una oportunidad única para la medición precisa de las variables involucradas en los cálculos gravitacionales. Tres sistemas con esta característica son: PSR 0820+02 siguiendo una órbita grande, con un período mayor a los 3 años y una compañera desconocida, PSR 0655+64 en una órbita pequeña, de período 1.029 días y con una compañera probablemente enana blanca; y PSR1913+16, el primer objeto descubierto de este tipo.

En 1974, las observaciones de PSR 1913+16 revelaron que el pulsar se mueve en presencia de un campo gravitacional relativamente fuerte siguiendo una órbita muy pequeña de alta excentricidad ($e \sim 0.617$), con un período muy corto (sólo 7 horas y 45 minutos), y con una velocidad orbital de aproximadamente un milésimo de la velocidad de la luz. Todo esto parece indicar que la compañera es un objeto compacto (estrella de neutrones) y que, en consecuencia, el sistema es ideal para probar las teorías gravitacionales; la RG predice que un sistema binario debe perder gradualmente energía, energía que el sistema está radiando en la forma de ondas gravitacionales y que, consecuentemente ambas componentes debe seguir un movimiento en espiral hacia el centro de masa del sistema.

La información recabada durante más de cinco años sobre los corrimientos Doppler de la señal periódica del pulsar, establece que las masas de los dos cuerpos en PSR 1913-16 son aproximadamente iguales entre sí y con un valor de 1.4 veces la masa del sol. La predicción cuantitativa de RG es, al usar dichos valores, una disminución en el período orbital de 10^{-7} segs. por órbita ó, equivalentemente, un corrimiento en la fase orbital de 1.2 segs. en cinco años. La concordancia entre los corrimientos observados en la fase orbital y la curva teórica predicha por la RG es asombrosa. Sin embargo, si bien esta concordancia constituye la primera (y única) evidencia experimental (indirecta) a favor de la existencia de ondas gravitacionales, existe un problema en cuanto a la manera en que se hace la predicción teórica. La dificultad reside en la derivación de la fórmula cuadrupolar para la radiación gravitacional que se utiliza en la predicción mencionada. Al derivar la fórmula estándar, Lev Landau y Evgenii Lifschitz (en la 3er. edición del libro "Teoría Clásica de Campos") escribieron: "En principio, todos los pasos de la derivación son completamente análogos a los que usualmente se realizan para las ondas electromagnéticas". La analogía obviamente despierta una fuerte atracción por la fórmula cuadrupolar pero, también subraya la razón por la que su validez es dudosa: la derivación utiliza una aproximación esencialmente lineal en un espacio-tiempo plano, mientras que la teoría sin aproximaciones, es fuertemente no lineal y trabaja con espacios curvos. Además de la derivación original se han realizado muchas otras pero, to-

das ellas son de una naturaleza poco satisfactoria. De manera que la intrigante posibilidad de que las observaciones difieran de los predicho por la fórmula correcta, aún no derivada, se mantiene abierta. Además existe el riesgo adicional de que si la fórmula conocida llega a incrementar su concordancia con las observaciones en algo más que un cierto porcentaje, se considere a las futuras objeciones a argumentos no rigurosos como meras argucias pedantes. De hecho, en algunas derivaciones muy recientes aparece contribuciones no-lineales en la fórmula cuadrupolar, contribuciones que se habían despreciado en un principio, y a las que nuevamente se desprecia, en el caso de PSR 1913-16, mediante "justificaciones" ad hoc. Los trabajos de investigación en este campo han llevado a que, al considerar el problema de qué se debe aproximar, se evite hasta donde sea posible el uso de conceptos intermedios como energía (extremadamente difícil de definir) y reacción de radiación, y que se centre la atención en cantidades medibles directamente (como los cambios en el período del pulsar binario).

Por otro lado, la RG predice también que en sistemas de este tipo, el acoplamiento entre el espín geodésico del pulsar y su movimiento orbital deben originar una precesión del eje de rotación del pulsar de aproximadamente un grado por año. J. H. Taylor, L. A. Fowler y P. M. McCulloch han construido un modelo que, haciendo uso de las teorías actuales sobre pulsares, explica la variación observada en los perfiles promediados de los pulsos. La explicación es precisamente en términos de una precesión que modifica la manera en que el haz emitido pasa por la línea de visión del observador. Sin embargo, las observaciones disponibles son pobres hasta la fecha y no es posible otra cosa más que esperar que en el futuro, las mediciones obtenidas de ellas permitan rechazar o aceptar el modelo.

Lentes Gravitacionales

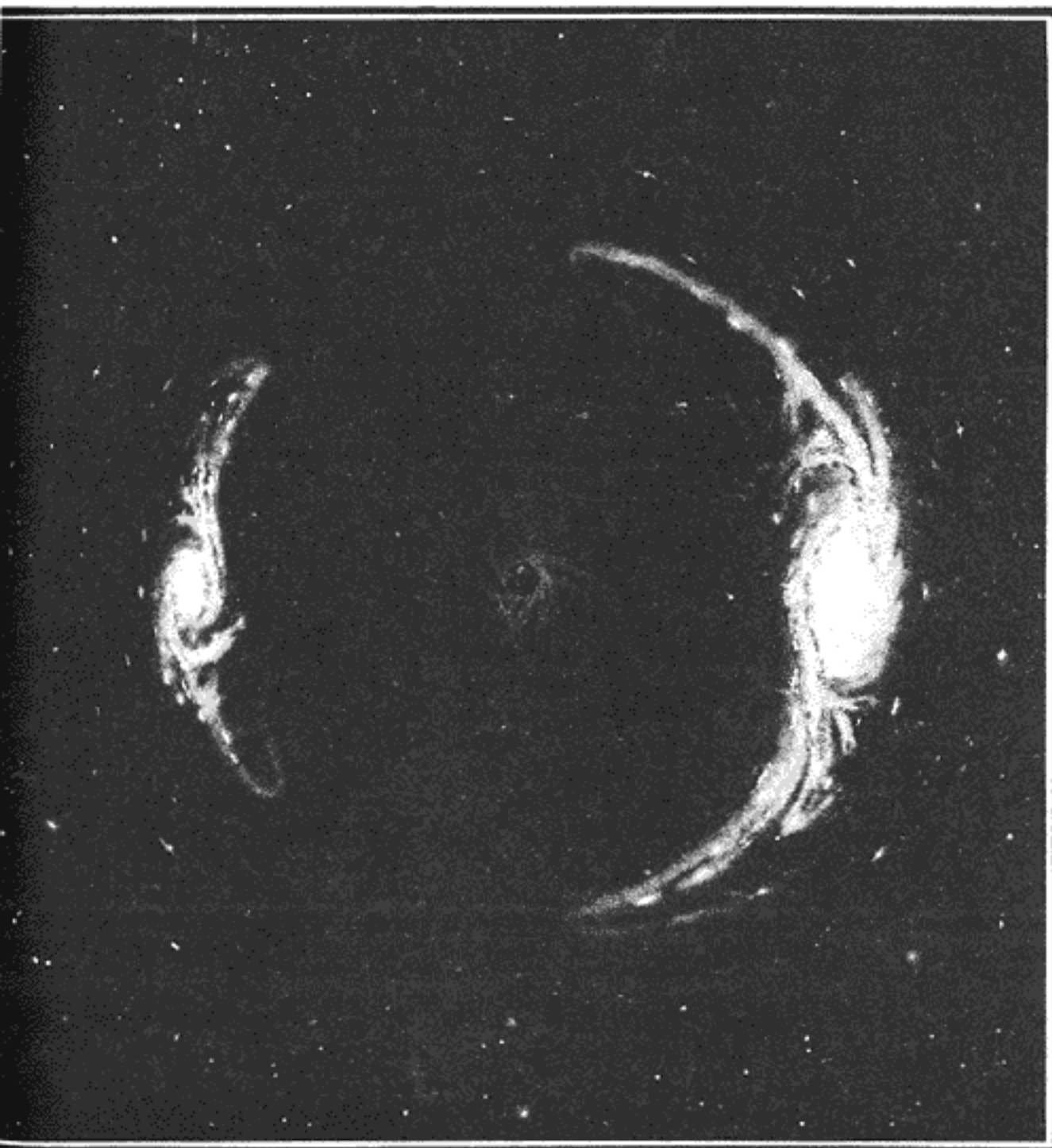
A pesar de que la ocurrencia de este fenómeno fue prevista desde 1936 por Albert Einstein (basándose en la desviación de la luz predicha por la RG), no fue sino hasta 1979 que se descubrió la presencia de un lente gravitacional en el espacio. Como vimos en la primera parte de este trabajo la luz o radiación electromagnética al poseer o acarrear energía, debe gravitar, es decir, debe interactuar con los campos gravitacionales que encuentre a su paso. La interacción se refleja en

una desviación de la radiación, desviación que ocasiona que la luz aparezca como proveniente de un lugar distinto al de su verdadero origen. Este efecto fue predicho por la RG y posteriormente corroborado durante algunos eclipses solares. Hoy día, mediante el uso de tecnología muy sofisticada (esencialmente radio-observaciones), no sólo es considerada como una de las pruebas clásicas que deben satisfacer las teorías de la gravitación, sino que además sirve de marco teórico para modelar geoméricamente la acción de los llamados lentes gravitacionales.

La desviación mencionada será mayor a medida que aumente la potencia del campo gravitacional que la origina y en consecuencia se puede pensar en una analogía con la refracción sufrida por la luz al pasar a través de un lente. Una galaxia suficientemente masiva, puede generar un efecto de "enfoco" sobre la luz proveniente de una fuente muy distante, y ocasionar que observemos no sólo una posición errónea,

sino múltiples imágenes del mismo objeto y/o una intensidad amplificada, dependiendo el resultado observado del grado de alineación entre fuente, lente y observador. La amplificación en la intensidad se debe únicamente al hecho de que el lente enfoca mayor cantidad de radiación en dirección a la tierra. Recientemente se ha demostrado que si se observan imágenes múltiples, el número de éstas debe ser impar siempre que la galaxia sea lo suficientemente grande como para no poder ser considerada un objeto puntual (adimensional). Consecuentemente una de las revelaciones más interesantes que ofrecen los lentes gravitacionales es el conocimiento global de la geometría y la escala del universo. Visto de otra manera recordemos que, de acuerdo a RG, podemos considerar la acción de la gravedad como una deformación del espacio-tiempo que, en la cercanía de la fuente gravitacional, se reflejará en líneas curvas (geodésicas) para las trayectorias de los cuerpos que por ahí pasen.

Lente gravitacional. El hoyo negro del centro tendría un campo gravitacional tan fuerte que nos haría ver varias imágenes de un solo objeto estelar.



Tal vez una de las razones por las que el descubrimiento del efecto "lente gravitacional" tardó tanto, es el hecho de que debido a lo vacío que es el universo, la probabilidad de encontrar a dos estrellas alineadas convenientemente en el universo observable es extremadamente pequeña. La gran ayuda que nos permitió la observación de volúmenes mayores y consecuentemente, el aumentar la probabilidad de encontrar alineaciones adecuadas, fue el descubrimiento de los llamados cuasares: objetos interpretados como galaxias hiperactivas que son lo suficientemente brillantes como para ser observadas a pesar de encontrarse a distancias del orden de 10^{10} años luz ($\sim 10^{23}$ km).

En marzo de 1979 se obtuvieron los primeros espectros de Q 0957 561 A y B: un par de cuasares separados por sólo 6 segundos de arco (el tamaño aproximado de una moneda de 20 centavos a 600 metros de distancia). La similitud de los espectros, corroborada posteriormente por observaciones de las radiaciones ultravioleta, infrarroja y en radiofrecuencias, proporcionan evidencia para la interpretación de los dos cuasares gemelos; como dos imágenes del mismo objeto ocasionadas por otro objeto masivo localizado entre el cuasar original y la tierra. Se suponía que este objeto era tan poco brillante o, que se encontraba tan lejos de la tierra, que no alcanzábamos a detectar su presencia a través de la radiación que emitía. Posteriormente, aunque se han descubierto más de mil cuasares, sólo se han encontrado otros dos casos que, interpretación de por medio, ejemplifican el efecto 'lente gravitacional': PG 1115 +080 A, B y C que es un cuasar "triple" y Q 2345 + 007, que es "doble".

El caso mejor estudiado es el de Q 0957 +561. Los corrimientos hacia el rojo, la intensidad de las líneas de emisión y la posición de las líneas de absorción, mediciones todas derivadas de la espectroscopía óptica, son idénticas en ambos cuasares. El objeto del sur (B) tiene aproximadamente 0.7 veces la brillantez del objeto al norte (A). De manera que, notando que dichas mediciones para el resto de los cuasares varían considerablemente entre cuasar y cuasar, sería una coincidencia asombrosa que dos cuasares con propiedades idénticas se encontrasen tan cerca uno del otro. Pero en fin, las coincidencias ocurren después de todo. Además, ya que las galaxias por sus dimensiones producen un número impar de figuras, y en este caso sólo se observaban dos, se necesitaría pen-

TEORIAS METRICAS DE GRAVITACION Y CRITERIOS DE VIABILIDAD QUE LE DEBEN SATISFACER

En la mayoría de las teorías métricas, la gravitación es un fenómeno fuertemente no lineal que, entre otras cosas, significa que la energía potencial combinada de dos cuerpos no es simplemente la suma de las energías individuales sino que los potenciales deben combinarse de una manera determinada por cada una de las teorías. En las teorías, el mecanismo de generación y funcionamiento de la gravedad es distinto al descrito anteriormente y la variedad de dichos mecanismos es tan basta como el número de científicos trabajando en el campo. La gran mayoría de teorías métricas difieren entre sí precisamente en la manera en que se determina la métrica de cada una de ellas. Sin embargo, comparten una característica crucial: no importa que tan complicada sea la teoría o que tipo de campos adicionales (gravitacionales o cosmológicos) se consideren en dicha teoría, la materia y los campos no gravitacionales obedecerán exclusivamente a la entidad teórica primordial: la métrica Riemanniana. El único papel posible de los demás campos considerados por la teoría es el de ayudar a generar la curvatura del espacio-tiempo asociada a la métrica. La materia puede crear estos campos y junto con ellos generar la métrica, pero dichos campos no podrán actuar directamente sobre la materia que obedecerá sólo a la métrica.

La razón por la que actualmente se le presta mayor atención a las teorías métricas, reside en el hecho de que en

los últimos años se han realizado trabajos teóricos que apoyan una conjetura debida a Schiff que establece, en su versión más reciente, que cualquier teoría de la gravitación que satisfaga los criterios para ser considerados como una teoría viable, satisface necesariamente el principio de equivalencia de Einstein.

Los criterios para determinar la viabilidad de una teoría, criterios que fueron estableciéndose paralelamente y motivados por el desarrollo de la teoría general de la relatividad, son:

- i) *Completez.* La teoría debe ser capaz de analizar a partir de principios e incorporando las leyes del electromagnetismo y la mecánica cuántica, el resultado de cualquier experimento.
- ii) *Autoconsistencia.* Las predicciones de la teoría deben ser únicas e independientes del camino usado para calcularlas.
- iii) *Relativista.* Cuando la gravitación es despreciable respecto a las demás interacciones físicas involucradas en el fenómeno bajo estudio, las leyes físicas se deben reducir a las de la relatividad especial.
- iv) *Newtoniana.* En presencia de campos gravitacionales débiles y para movimientos lentos, la teoría debe reproducir la ley de Newton con la precisión adecuada.

v) Debe incorporar el principio de equivalencia débil (PED): *Si a una partícula de prueba, descargada, localizada en el espacio tiempo, se le da una cierta velocidad inicial, entonces su evolución subsecuente será independiente de su estructura y composición internas.*

vi) Debe satisfacer la *universalidad del corrimiento gravitacional hacia el rojo (UCG): "Dicho corrimiento para un par de relojes ideales idénticos situados en dos eventos del espacio-tiempo, es independiente de la estructura y composición de los mismos".*

El principio de equivalencia de Einstein establece que el PED y la UCG son válidos y que el resultado de cualquier experimento no gravitacional realizado en un marco de referencia en caída libre, es independiente de dónde y cuándo se lleva a cabo el experimento. El paso desde el PEE a los postulados de una teoría métrica es directo ya que dichos postulados sólo piden, además del PEE, que exista una métrica para el espacio-tiempo y que las trayectorias de las partículas de prueba sean líneas geodésicas de la misma métrica. Un resultado reciente implica que si el PED y la UCG deben ser satisfechos por la teoría para el caso de campos gravitacionales esféricamente simétricos y estáticos, entonces la teoría debe ser necesariamente una teoría métrica.

sar en un hoyo negro (puntual) como responsable del efecto. El análisis de la información contenida en las partes infrarroja y ultravioleta del espectro ayudó a aclarar la situación. La teoría predice que si ambas imágenes provienen del mismo objeto, entonces la intensidad de la imagen B debería ser siempre un cierto porcentaje fijo de la intensidad de A en mediciones simultáneas. Incorporando posibles variaciones a largo plazo en la brillantez del cuasar, se obtiene que la imagen B debería tener entre 70 y 80% de la intensidad de A en todas las longitudes de onda del espectro porcentaje que, como vimos se observa en la radiación ultravioleta e infrarroja. Las observaciones en radio-frecuencias ocasionaron problemas en un princi-

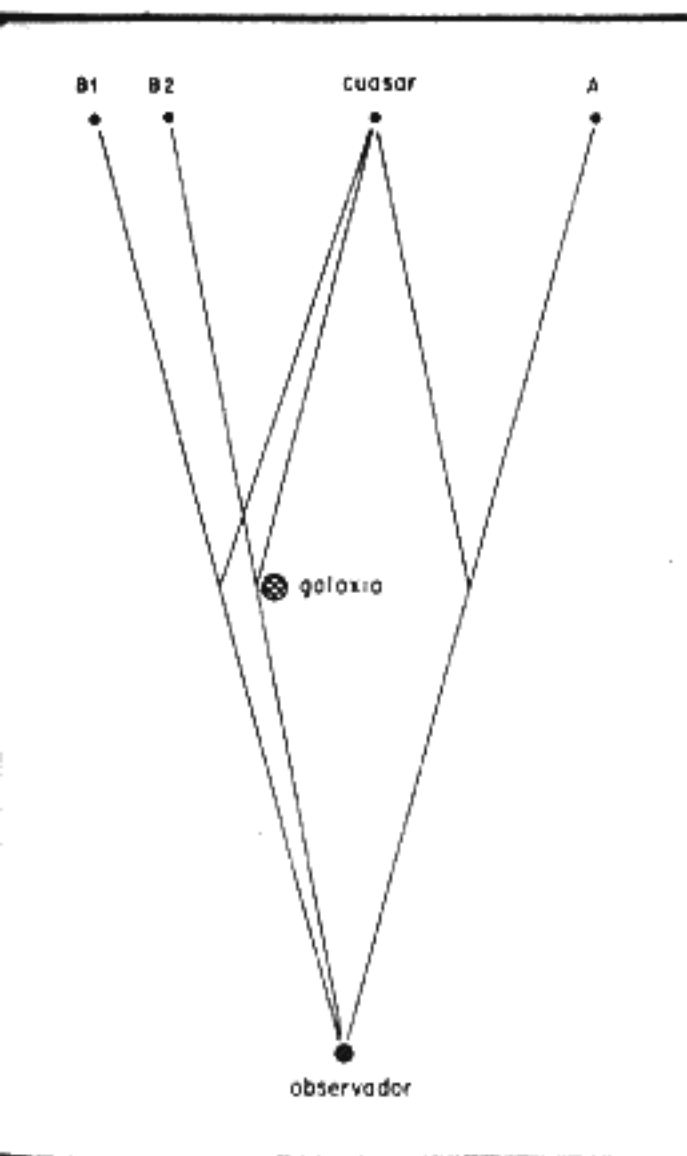
pio: aparecieron ciertos rasgos relacionados con la imagen A que la imagen B no mostraba, a pesar de que ambas imágenes ópticas coincidían con las radio-imágenes. Radio observaciones subsecuentes detectaron una tercer imagen mucho más débil que las otras dos y al norte de B. Finalmente, con el uso de detectores electrónicos se logró en noviembre de 1979 localizar una imagen que interpretada como la correspondiente a una galaxia, nos permite una formulación global y coherente de la situación. La imagen interpretada así, se encuentra inmediatamente al norte de B pero sólo se observa al "filtrar" la radiación proveniente de B. La tercer imagen se encuentra sumergida en la de la galaxia, posiblemente contribuyendo a ésta en

forma mínima. La galaxia se encuentra además en un cúmulo de galaxias que bien podría ayudar al proceso de desviación de la radiación y que consecuentemente, debería tomarse en cuenta para el refinamiento del modelo. Fig. 4

Las implicaciones de este tipo de descubrimientos son muy interesantes ya que afectan la visión del universo como un todo. La simple existencia del fenómeno demuestra que tres cuasares al menos, se encuentran a distancias mucho mayores que las galaxias causantes del fenómeno y que por lo tanto, sus fuertes corrimientos hacia el rojo ciertamente se deben a la expansión del universo y no a cualquier otro mecanismo de los propuestos. El

aumento en la brillantez de algunos cuasares causado por lentes gravitacionales puede oscurecer la interpretación de la estadística sobre cuasares, la cual argumenta a favor de una 'era de cuasares' en la evolución cósmica primaria. El efecto puede utilizarse para detectar la presencia de objetos (demasiado débiles para ser observados) a través de los cambios en la intensidad de la radiación en las imágenes de cuasares. Dichas variaciones pueden también utilizarse para calcular la distancia al objeto lente e indirectamente, la escala del universo. Esto último, debido a que la distancia al cuasar a lo largo de la trayectoria luminosa de una imagen es distinta de la distancia a lo largo de cualquiera de las trayectorias de las otras imágenes; de manera que si el cuasar repentinamente aumenta su potencia de radiación, una imagen se vuelve más brillante antes que las otras. Midiendo este "retraso" temporal podremos determinar la diferencia en longitudes de las distintas trayectorias y consecuentemente, las distancias al cuasar y al objeto lente. Mediante estas distancias tendremos una visión más clara de la escala global cósmica de distancias. ⊕

Fig. 4 Ilustración esquemática de un lente gravitacional: Q0957 + 561. Los ángulos han sido exagerados para mayor claridad. El lente produce tres imágenes del cuasar, representadas por A, B1 y B2.



REFERENCIAS PARA LECTURAS COMPLEMENTARIAS

Sobre Einstein, RG e historiográficas:

Einstein for Beginners. J. Schwartz & McGuinness Writers and Readers Publishing Coop. London, 1979.

Einstein, Hilbert and the Theory of Gravitation. Jagdish Mehra. D. Reidel Publishing Company. Boston 1974.

History of the theories of Aether and Electricity. Sir Edmund Whittaker. T. Nelson and Sons LTD. London, 1953. (Tomo II).

Gravitation and Cosmology. Capítulo I. Steven Wingberg. John Wiley and Sons Inc. New York, 1972.

Sobre Gravitación:

Gravitation Theory. Clifford M. Will. *Scientific American*, November 1974.

Einstein on the Firing Line. Clifford M. Will. *Physics Today*, October 1972.

The Eotvos Experiment. Robert H. Dicke. *Scientific American*, December 1961.

Gravitation and Cosmology. Steven Weinberg. John Wiley and Sons Inc. New York, 1982.

Sobre hoyos negros:

Black Holes. Roger Penrose. *Scientific American*. May 1972.

Black Holes: New Horizons in Gravitational Theory. P. C. Peters. *American Scientist* 62, 575, 1974.

Introducing the Black Hole. R. Ruffini and J. A. Wheeler. *Physics Today*, January, 1971.

The Search for Black Holes/Gravitational Collapse. Kip. S. Thorne. *Scientific American*, December, 1974/November 1967.

The Quantum Mechanics of Black Holes. Steve W. Hawking. *Scientific American*, January 1977.

Black Holes, Gravitational Waves and Cosmology. M. Rees, R. Ruffini & J. A. Wheeler. Gordon and Breach Science Publishers. London, 1975

Sobre Pulsares Binarios:

Measurements of General Relativistic Effects in the Binary Pulsar PSR 1913 + 16. J. H. Taylor, L. A. Fowler & P. P., McCulloch. *Nature* 277, 437, February 8, 1979.

Theoretical Difficulties with the Binary Pulsar? Malcolm McCallum. *Nature* 280, 449, August 9, 1979.

Comments on Gravitational Radiation Damping and Energy Loss in Binary Systems. J. Ehlers, A. Rosenblum, J. N. Goldberg & P. Havas. *Astrophysical Journal* 208, L77, 1976.

Pulsars. R. N. Manchester and J. H. Taylor. W. H. Freeman and Co. San Francisco, 1977.

Gravitational Radiation from a Binary System. P. H. Lim. *General Relativity and Gravitation* 14, 471, 1982.

The Future of Gravitational Wave Astronomy. Kip. S. Thorne. *Mercury* 7, 3, 58, 1979.

Sources of Gravity Waves. T. J. Sejnowski. *Physics Today*, January 1974.

Gravitational Waves: a Progress Report. J. L. Logan. *Physics Today*, March 1973.

Sobre Lentes Gravitacionales:

Lens Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field. Albert Einstein. *Science* 84, 506, December 4, 1936.

The Discovery of the Gravitational Lens. Frederic H. Chaffee Jr. *Scientific American*, November 1980.

Q957 + 561 A, B: Twin quasistellar objects of Gravitational Lens? D. Walsh, R. F. Carswell & R. J. Weymann. *Nature* 279, 381, May 31, 1979.

Gravitational Lenses and the Double Quasar. J. K. Lawrence. *Mercury* 9, 3, 66, 1980.

Q 0957 + 561: Detailed Models of the Gravitational Lens Effect. P. Young. *Astrophysical Journal* 244, 736, 1981.

Gravitational Lenses; From Einstein to the Double Quasar. D. H. Roberts and B. F. Burke. *Technology Review* 83, 4, 68, 1981.