

## STEPHEN HAWKING: LA NECESIDAD DE ENTENDER EL UNIVERSO

**Ricardo Baeza**

El 28 de agosto de 1997, Stephen Hawking dictó una memorable conferencia en Santiago sobre la estructura del universo. El presente artículo explica algunas de las ideas básicas contenidas en esa exposición.

El 28 de agosto de 1997 se reunieron en Santiago más de cuatro mil personas para escuchar hablar al físico teórico inglés Stephen Hawking sobre la estructura del universo. Sin duda este evento causó un impacto importante en la vida cultural chilena, y a su vez dejó de manifiesto la necesidad de llenar un vacío de grandes proporciones en nuestra vida intelectual. Es probable que las ideas presentadas por Hawking a un público tan heterogéneo no hayan sido comprendidas en su totalidad, pero sí es claro que las personas que allí se reunieron en verdad querían entenderlas.

Por esta razón, tratar de explicar algunas de las ideas expuestas por Hawking resulta sin duda interesante.

A continuación expondremos, desde el punto de vista de un no experto, lo que creemos son las ideas más básicas necesarias para que el lector no experto entienda el contenido de la conferencia de Hawking.

---

RICARDO BAEZA R. Doctor en Matemáticas, Universidad de Saarbrücken. Habilitación, Universidad de Saarbrücken. Miembro de número de la Academia Chilena de las Ciencias. Profesor Titular de la Universidad de Chile.

2. A comienzos del siglo 20 fueron desarrolladas dos teorías que modificaron por completo la visión del universo conformada durante los siglos anteriores y que se basaba en las ideas de Galileo, Kepler, Newton y otros. Una de estas teorías cambió el concepto del macroespacio-tiempo y fue desarrollada esencialmente por Albert Einstein, quien la llamó teoría general de la relatividad. La otra teoría, llamada mecánica cuántica, iniciada por Max Plank, A. Einstein, N. Bohr y otros, y desarrollada por Heisenberg, Schrödinger y Dirac, cambió los conceptos del microespacio-tiempo.

La teoría general de la relatividad estudia la estructura del espacio-tiempo a grandes escalas y se aplica fundamentalmente en cosmología. En esta teoría se postula que la geometría del espacio-tiempo está determinada por la materia y energía existentes en el universo. La ecuación

$$\text{Geometría} = \text{materia} - \text{energía}$$

es la base de esta teoría y sintetiza dicha idea.

Por otro lado, la mecánica cuántica trata problemas físicos a muy pequeña escala, es decir a nivel de moléculas y átomos. A diferencia de la teoría de la relatividad, que es una teoría clásica en el sentido de que los objetos están determinados por coordenadas, la mecánica cuántica no permite predecir ninguna observación en forma definitiva, sino sólo afirmar que puede ocurrir un número de diferentes sucesos y el grado de probabilidad de cada uno de ellos. Uno de los principios más básicos de la mecánica cuántica, y que la hace diferir de una teoría clásica, es el principio de incertidumbre de Heisenberg. Este principio afirma que es imposible medir simultáneamente la posición y la velocidad de una partícula. De este modo, hay siempre un factor de incertidumbre (es decir, una probabilidad) en cada suceso, lo cual afecta en forma esencial el comportamiento de la materia a pequeñas escalas. Es interesante notar que siendo Einstein uno de los precursores de la física cuántica, estas ideas le eran adversas. Podríamos decir que su posición se resume en su famosa frase: Dios no juega a los dados. Pero como lo hace notar Hawking, al parecer, Dios sí es un gran jugador (Hawking, 1988).

3. En 1887, los físicos Albert A. Michelson (1852-1931) y E. W. Morley desarrollaron un experimento fundamental que tuvo profundas consecuencias en las bases de la física al demostrar que la velocidad de la luz es la misma si se la mide en la dirección de la órbita de la tierra que si se la mide en una dirección perpendicular a esta órbita. Este resultado, que fue confirmado con gran exactitud en 1964, demostró el principio fundamental

de la relatividad, que afirma que la velocidad de la luz es la misma para todo observador que se mueve con respecto a otro con velocidad constante. El valor numérico de esta constante universal es  $c = 300.000$  km/seg. Este principio está en contradicción con los principios básicos de la mecánica desarrollada por Newton, en la que el tiempo es una variable absoluta. Una consecuencia, por lo tanto, del experimento de Michelson-Morley es que hay que abandonar el concepto de tiempo absoluto en favor del que afirma que la velocidad de la luz es una constante absoluta. Basándose en este principio, Albert Einstein escribe en 1905 su primer trabajo sobre la teoría de la relatividad, a la que llamó teoría de relatividad especial, que explica el movimiento de objetos en el espacio-tiempo, pero sin involucrar la geometría del espacio-tiempo que está afectada por la presencia de objetos masivos. Es decir, la teoría especial de la relatividad no toma en cuenta los efectos gravitacionales. El intento de reformular la teoría de la gravitación de Newton dentro de los principios básicos de la relatividad especial condujo finalmente, en 1915, a una de las mayores revoluciones de la noción de espacio-tiempo: la teoría general de la relatividad.

Durante diez años (a partir de 1905) Einstein y otros físicos, como por ejemplo Abraham y Nordström, trataron de desarrollar una teoría relativista de la gravitación. Uno de los pasos fundamentales lo dio Einstein en 1907 cuando introdujo el principio de equivalencia de gravitación e inercia —aunque esto no fue suficiente para encontrar las ecuaciones del campo gravitacional—, el cual le sirvió, en 1911, para calcular la desviación de la luz bajo el campo de gravitaciones del sol, pero su resultado fue exactamente la mitad del valor correcto que se obtiene al usar las ecuaciones de la gravitación de la relatividad general. A partir de 1913, la colaboración con el matemático M. Grossman permitió a Einstein concebir el campo gravitacional como el tensor métrico de un cierto espacio riemanniano (este concepto lo describiremos un poco más adelante), y después de varios intentos, en el año 1915, al fin, presentó dos trabajos en los anales de la Academia de Ciencias de Prusia con las ecuaciones generales de la gravitación (Pais, 1982). Clásicamente, la gravedad era pensada como una fuerza que ejercían los cuerpos entre sí para atraerse. La idea básica en esta nueva teoría fue pensar que la gravedad estaba determinada por la geometría del espacio-tiempo, la cual a su vez estaba determinada por la materia y energía existentes en el espacio. Así, la gravedad resultaba ser una distorsión del espacio-tiempo causada por la materia y energía contenidas en él. Esta idea se expresa en la ecuación

$$\text{Geometría} = \text{Gravitación}.$$

Es notable el hecho de que ya en 1850 un matemático alemán, Bernhard Riemann (1826-1866), había formulado esta ecuación, estableciendo que la

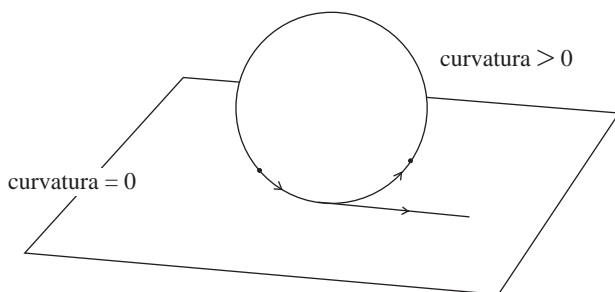
$$\text{Energía-materia} \implies \text{curvatura del espacio-tiempo}.$$

Esta idea es tal vez una de las más revolucionarias en la historia de la ciencia. De ella se desprenden las ecuaciones que determinan la dinámica de las galaxias, predicen la existencia de hoyos negros y del Big-Bang (gran explosión), el cual se interpreta como el origen del universo.

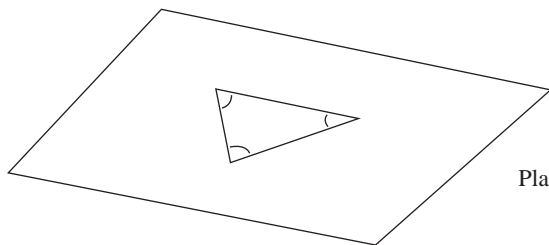
Volveremos más adelante sobre este tema.

Riemann dio un paso trascendental, rompiendo con más de 250 años de dominio de las ideas de Newton, al proponer que la noción de fuerza (y gravedad) es consecuencia de la geometría del espacio. Es la curvatura del espacio la que nos fuerza a movernos de cierta manera.

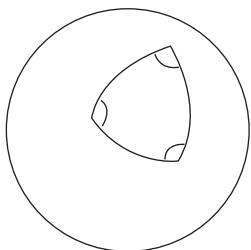
Pensemos en un ser que vive sobre una esfera. Riemann se dio cuenta de que tal ser pensaría que su mundo es totalmente plano, pues su cuerpo también estaría curvado y, por lo tanto, no vería que la esfera es curva (como lo haríamos nosotros si observamos desde afuera de la esfera). Si este ser tratara de escapar de la esfera, por ejemplo a lo largo de una recta tangente, entonces experimentaría una “fuerza” que lo obligaría a permanecer sobre dicha esfera. Esta “fuerza” que lo obliga a permanecer sobre la esfera es precisamente consecuencia de la curvatura de ella.



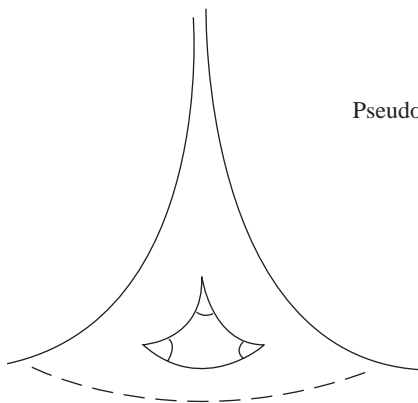
La curvatura de un objeto geométrico es un número que mide cuán curvo es este objeto. Por ejemplo, un plano tiene curvatura 0, una esfera de radio  $r > 0$  tiene curvatura  $1/r$  y la curvatura de una pseudoesfera es  $-1$ :



Plano, curvatura = 0



Esfera de radio  $r$ , curvatura  $= \frac{1}{r} > 0$



Pseudoesfera, curvatura  $< 0$

La geometría de estos tres objetos es completamente diferente. Sobre un plano, la suma de los ángulos interiores de un triángulo es siempre  $180^\circ$  y las rectas paralelas nunca se cortan. Sobre una esfera, la suma de los ángulos interiores de un triángulo es siempre mayor que  $180^\circ$  y las líneas paralelas se cortan. Sobre una pseudoesfera, la suma de los ángulos internos es siempre menor que  $180^\circ$ .

La idea de Riemann era poder estudiar todos estos casos dentro de un concepto general de espacio. Por ejemplo, sobre una superficie se puede asociar a todo punto una colección de tres números  $g_{11}$ ,  $g_{12} = g_{21}$ ,  $g_{22}$ , llamados “tensor métrico”, los cuales definen la manera de medir distancias sobre la superficie y a su vez describen completamente la manera de curvarse de esta superficie. El tensor métrico ( $g_{11}$ ,  $g_{12}$ ,  $g_{22}$ ) es lo que un físico llamaría un campo. Un campo es una colección de números definidos en cada punto del espacio, los cuales describen un objeto físico, como por ejemplo una fuerza que se ejerce sobre cada punto. El campo eléctrico o el campo magnético son también ejemplos de este concepto. La idea de Riemann fue introducir una colección de números asociados a cada punto del espacio, los cuales describen la forma como se curva el espacio. Este campo (tensor métrico) determina la geometría del espacio, su curvatura, y por lo tanto, en el caso del espacio-tiempo, la “fuerza” que el espacio ejerce sobre los objetos que se mueven en él. En resumen, este campo es simplemente lo que llamamos campo gravitacional. Sin duda Riemann reconoció la significancia de esta idea, pero no logró descubrir las condiciones o restricciones que deben satisfacer los componentes  $g_{ij}$  (en este caso  $i, j$  recorren los números 1, 2, 3, 4 y por lo tanto hay 10 componentes) para describir la geometría del espacio-tiempo. En efecto, estas restricciones fueron encontradas por Einstein en 1915 y son lo que llamamos las ecuaciones de la gravitación.

Es curioso el hecho de que cinco días antes que Einstein presentara a la Academia de Prusia su trabajo fundamental que contenía estas ecuaciones, David Hilbert, uno de los matemáticos más distinguidos de esa época, expuso a la Academia de Göttingen un corto trabajo sobre fundamentación de la física matemática, en el cual, basándose en principios muy generales (principios variacionales), deduce las mismas ecuaciones de la gravitación. Recomendamos el excelente libro de Abraham Pais (1982) para informarse sobre esta controversia.

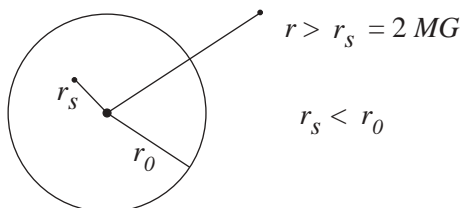
De esta manera, Riemann, fuera de crear el marco matemático adecuado para desarrollar parte de la física del siglo veinte, es decir, para introducir los espacios geométricos que hoy llamamos espacios riemannianos, también interpretó el concepto de gravedad como un campo definido

sobre estos espacios, el cual determina cuán curvo es el espacio. Este campo se llama el tensor métrico.

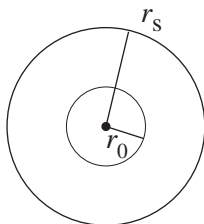
4. La primera solución explícita de las ecuaciones de la gravitación de Einstein no se dejó esperar y fue encontrada por el físico matemático alemán K. Schwarzschild (1873-1916) en 1916, casi dos meses después que Einstein las publicara. Es interesante destacar las circunstancias difíciles bajo las cuales Schwarzschild desarrolló su trabajo: durante la primavera y el verano de 1915 sirvió en el ejército alemán en el frente ruso. En ese período contrajo una enfermedad mortal y murió el 11 de marzo de 1916, poco antes que apareciera su trabajo con la solución a las ecuaciones de Einstein. Fue durante su enfermedad, mientras permanecía en el hospital, que Schwarzschild escribió sus dos trabajos sobre relatividad. La solución presentada por él considera el caso del campo gravitacional que desarrolla un cuerpo con simetría esférica. Ya esta solución presenta una de las características fundamentales de la teoría de la relatividad general, la cual consiste en predecir la existencia de singularidades, es decir, regiones del espacio donde la teoría deja de ser válida. Al final de este artículo trataremos de explicar mejor esta noción, pero por el momento nos conformaremos con decir que las soluciones de las ecuaciones de la gravitación no están definidas en ciertas regiones o puntos del espacio, o también que predicen que la curvatura del espacio se hace infinita en ciertos puntos. Matemáticamente, la solución de Schwarzschild, que representa el campo gravitacional determinado por un objeto con simetría esférica, afirma que la métrica del espacio-tiempo es

$$g_{11} = -\left(1 - \frac{2MG}{r}\right), \quad g_{22} = \left(1 - \frac{2MG}{r}\right)^{-1},$$

etc., donde  $M$  es la masa del cuerpo,  $r$  la distancia al centro de él y  $G$  una constante universal. De inmediato vemos que estas fórmulas no están definidas en  $r = 0$ , así como tampoco en  $r = 2MG$ . Este último valor  $r_s = 2MG$  se llama radio de Schwarzschild y es, en general, mucho menor que el radio  $r_0$  del objeto que produce el campo gravitacional,



De modo que en general el problema de si están o no las expresiones  $g_{11}$ ,  $g_{22}$  bien definidas es irrelevante, pues siempre se calculan para  $r > 2MG$ . El caso  $r = 0$  ó  $r < 2MG$  fue desechado por Einstein argumentando que no era físicamente relevante y que la solución de Schwarzschild es válida sólo para  $r > 2MG$ . De esta manera, Einstein y otros físicos de la época perdieron la oportunidad de reconocer (teóricamente) el primer hoyo negro. Si suponemos que el objeto de masa  $M$  tiene radio  $r_0 < 2MG$



entonces la situación dentro de la región  $r < 2MG$  es completamente distinta a la región  $r > 2MG$ . Los sucesos que ocurren dentro de  $r < 2MG$  están completamente incomunicados con el exterior  $r > 2MG$ . En particular, todo rayo de luz que se emita dentro de la región  $r < 2MG$  no puede cruzar el límite de  $r = 2MG$  y permanece dentro de ella. Es por eso que esta región no se puede ver desde el exterior y recibe el nombre de hoyo negro. Es curioso el hecho de que la idea de que existan hoyos negros es bastante antigua. En 1783 un profesor de Cambridge, John Mitchell, publicó un artículo en el *Philosophical Transaction of the Royal Society*, donde afirma que una estrella con una masa suficientemente grande y un radio pequeño generaría alrededor de ella un campo gravitacional tal, que la luz que ella emita no podría escapar de este campo y sería absorbida de nuevo, de modo que desde lejos esta estrella no se podría ver y sería por lo tanto un hoyo negro. Pocos años después, en 1798, Laplace publicó una demostración matemática de esta afirmación (ver Apéndice de Hawking-Ellis, 1973). Obviamente, los argumentos usados por Laplace se basan en la mecánica de Newton, que, como hemos mencionado, está reñida con uno de los principios básicos de la relatividad, a saber, que la velocidad de la luz es una constante absoluta. Sin embargo, es notable que en ambas teorías la noción de hoyo negro tiene sentido. Pero la gran diferencia es que la teoría de la relatividad implica la existencia de ellos! Así, tenemos dos maneras de considerar un hoyo negro. Por un lado, tal como lo hicieron Mitchell y Laplace, la fuerza de atracción que ejerce una estrella muy masiva sobre un rayo de luz que emite es tan grande que lo obliga a doblarse y lo hace girar en torno a ella o a volverse hacia ella. Por otro lado, usando los principios



de la relatividad general, se deduce que la geometría alrededor de una estrella masiva es tal que el espacio se curva, de manera que todas las posibles trayectorias dentro de esta región quedan en ella, y así esta parte del espacio se “desconecta” del resto del espacio.

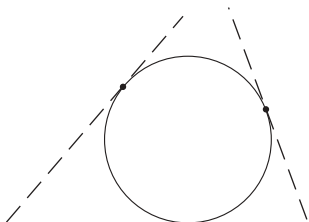
¿Cómo puede formarse una estrella con estas características?

En 1939 el físico norteamericano Robert Oppenheimer (junto con H. Snyder) publicó un trabajo con el título “On continued gravitational attraction” (Oppenheimer, 1939), donde ya en el resumen se anuncia: “Cuando todas las fuentes de energía termonuclear se acaban, una estrella suficientemente masiva colapsa. Entonces empieza una contracción de ella que continuará indefinidamente”. En realidad, este trabajo es el comienzo de la era de los hoyos negros, aunque ese nombre les fue asignado muy posteriormente por el físico John A. Wheeler. Una estrella se mantiene estable cuando hay un balance de dos tipos de fuerzas: una, la gravedad, trata de comprimir la estrella debido a la atracción entre las partículas que la componen, y la otra, la fusión nuclear, trata de hacer explotar la estrella liberando grandes cantidades de energía. Pero si, tal como lo afirma Oppenheimer, la energía nuclear de una estrella se agota y la estrella queda formada sólo de neutrones, entonces la fuerza gravitacional entre las partículas que la componen es de tal magnitud que ella se comprime cada vez más. Si su radio se hace cada vez más pequeño y resulta ser menor que  $2MG$ , donde  $M$  es la masa de la estrella, entonces se ha producido un hoyo negro (Kaku, 1994).

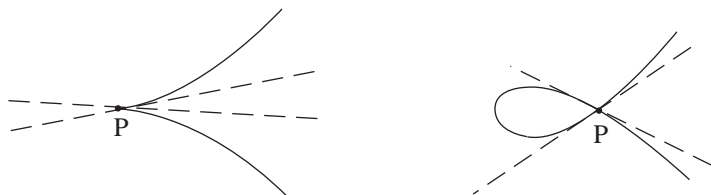
5. La solución de Schwarzschild comentada anteriormente nos muestra un ejemplo de lo que llamamos una singularidad del espacio-tiempo. La palabra “singularidad” es, para un matemático, en general, sinónimo de que los conceptos que se están tratando dejan de estar bien definidos, ya sea porque aparecen expresiones que toman valores infinitos, como es el caso de

$$1 - \frac{2MG}{r} \quad \text{para } r = 0,$$

o porque algún objeto que tenía un comportamiento regular deja de pronto de tenerlo. Por ejemplo, pensemos en la noción de tangente a una curva. La siguiente curva (círculo) tiene una tangente bien definida en todas partes



y en este caso diremos que un círculo es una curva no singular. Sin embargo, si consideramos las siguientes curvas:



vemos que ellas no tienen *una* tangente bien definida en el punto  $P$ . Es por esta razón que se dice que son singulares (en el punto  $P$ ). Los físicos también han extendido la noción de singularidad para expresar situaciones donde una teoría física deja de ser válida. En general las soluciones de las ecuaciones de la gravitación que se obtienen suponiendo algún grado de simetría del espacio siempre conducen, tal como lo muestra la solución de Schwarzschild, a una singularidad. Hasta los años sesenta muchos físicos teóricos creían que la existencia de singularidades era una consecuencia de las hipótesis de simetría que se imponían al espacio-tiempo con el fin de obtener soluciones exactas. Sin embargo, los espectaculares resultados a que llegaron en los años siguientes Roger Penrose y S. Hawking condujeron a dejar de lado esta creencia. En esencia, esos resultados afirman que bajo hipótesis muy generales sobre el espacio, como por ejemplo que haya suficiente materia en él, *toda* solución de las ecuaciones de la gravitación necesariamente implica la existencia de singularidades. Sin embargo, aquí el término singularidad es mucho más sutil y tiene un sentido más amplio que no implica, por ejemplo, que en el espacio-tiempo, en alguna región, la curvatura sea infinita. Por singularidad entendemos aquí el hecho de que en el espacio-tiempo existe una trayectoria (historia de un suceso) que necesariamente tiene un comienzo o un fin (o ambos) en tiempo finito. La existencia de estas trayectorias se obtiene, tal como lo mencionamos, bajo hipótesis muy generales sobre el espacio-tiempo, y la demostración se basa en resultados profundos de geometría y topología diferencial. El físico S. Chandrasekhar arribó a un resultado, que fue uno de los antecedentes de los teoremas sobre singularidades, con el cual demostró que, bajo hipótesis

un poco más restringidas que las de Penrose-Hawking, toda geodésica (historia de un suceso) en un espacio-tiempo donde se cumplen las ecuaciones de Einstein tiene un comienzo en tiempo finito. Este comienzo se puede interpretar como la existencia del Big-Bang (gran explosión). La idea del Big-Bang ya se había originado cuando, en los inicios de la teoría de la relatividad, se pudo demostrar experimentalmente que las estrellas se separan unas de otras a velocidades fantásticas. Se puede verificar este aserto midiendo la distorsión de la luz emitida por las estrellas, llamada desviación al rojo, pues la luz emitida por una estrella que se aleja de nosotros tiende a moverse hacia longitudes de onda más largas, es decir hacia el rojo de su espectro. Esto se llama efecto Doppler y fue anunciado en 1929 por el astrónomo Edwin Hubble. Otra evidencia de la existencia del Big-Bang, y tal vez la más importante, es el eco cósmico de la gran explosión, que se traduce en una permanente radiación en microondas que se puede medir en todas partes. La idea de que el eco del Big-Bang debería estar presente en todo el universo después de billones de años de la gran explosión fue enunciada, en base a cálculos teóricos, por el físico G. Gamow y su colaborador R. Alpher en el año 1948. Su predicción de que este eco debería notarse como una radiación (en forma de fotones) a una temperatura levemente superior sobre el cero absoluto no fue tomada en serio en esa época.

Hasta 1964 no se hicieron intentos para medir esta radiación. Fue entonces cuando los físicos Robert Dicke y J. Peebles (en Princeton) empezaron a repensar las antiguas ideas de Gamow y sus colaboradores. En forma simultánea, y por casualidad, A. A. Penzias y R. W. Wilson (ambos de los Laboratorios Bell) descubrieron con su detector de microondas una misteriosa radiación en microondas que estaba presente en todas partes y en forma constante. Al principio pensaron que se trataba de interferencias causadas, por ejemplo, por depósitos hechos por pájaros. Pero después de desarmar la antena y limpiarla, el ruido permaneció intacto. Al informarse de que Dicke y Peebles estaban realizando experimentos para medir la supuesta radiación cósmica de fondo predicha por Gamow, Wilson y Penzias se percataron de la importancia del descubrimiento que habían hecho. Se cuenta que habrían dicho: “O hemos visto un montón ... de pájaros o la creación del universo”. Las mediciones de Penzias y Wilson coinciden casi exactamente con lo predicho por Gamow y corresponden a la radiación de un cuerpo negro de alrededor  $3\text{ }^{\circ}\text{K}$  ( $0\text{ }^{\circ}\text{K} = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Recientes mediciones hechas con el satélite COBE (Cosmic Background Explorer) han confirmado ampliamente este resultado. De este modo, el Big-Bang es la singularidad más espectacular predicha por la teoría de la relatividad. Recomendamos al lector el espectacular libro de S. Weinberg (1988) para informarse más sobre el comienzo del universo.

Uno de los problemas fundamentales que se presentan para la teoría general de la relatividad es que alrededor de una singularidad las leyes de esta teoría dejan de ser válidas. A escalas muy pequeñas, alrededor de  $10^{-33}$  cm, son otras las leyes que entran en juego y así uno de los problemas más excitantes de la física teórica en la actualidad es poder unificar la teoría de la gravitación con la mecánica cuántica. Este objetivo está todavía lejos de ser alcanzado.

#### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Hawking, S. W.; Ellis, G. F. R. (1973). *The Large Scale Structure of Space-Time*. Cambridge University Press.
- (1988). *A Brief History of Time*. Nueva York: Bantam Books.
- (1993). *Black Holes and Baby Universes and Other Essays*. Bantam Books.
- Kaku, M. (1994). *Hyperspace*. Andior Books, Doubleday.
- Oppenheimer, I. R.; Snyder, H. (1939). "On Continued Gravitational Contraction". *Phys. Rev.*, 56, pp. 455-459.
- Pais, A. (1982). *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford University Press.
- Weinberg, S. (1988). *The First Three Minutes: A Modern View of the Origin of the Universe*. Nueva York: Basic Books. □