



# *Ciclos del Tiempo*

Roger  
Penrose

*Una extraordinaria nueva  
visión del universo*

Roger Penrose ha vuelto a sorprendernos con un nuevo libro de física especulativa. En la frontera entre lo científico y lo metafísico presenta un modelo geométrico del origen de nuestro universo que se remonta, más allá del tiempo, hasta la frontera metafísica previa al Big Bang. *Ciclos del tiempo* es la reciente publicación que corona cinco años de esfuerzo intelectual por abordar grandes preguntas del conocimiento. ¿Qué hubo antes del Big Bang? ¿Cuál es el origen del orden estructural? ¿Cómo será el futuro de nuestro universo?

Las dos ideas clave que hay detrás de esta nueva visión son un penetrante análisis de la Segunda Ley de la termodinámica (que establece el principio de la entropía) y el estudio de la geometría de cono de luz del espacio-tiempo. Penrose logra combinar estos dos temas para demostrar que el destino último de nuestro universo en expansión y aceleración puede ser visto como el Big Bang de uno nuevo. Por el camino, nos explica muchos otros ingredientes básicos de esta idea y comenta varios modelos cosmológicos, tanto ortodoxos como heterodoxos, así como el papel fundamental y ubicuo de la radiación cósmica de microondas. Otra parte crucial de su exposición es la relativa a los inmensos agujeros negros detectados en los centros de las galaxias, y su eventual desaparición a través del misterioso proceso de evaporación de Hawking.

## Prefacio

Uno de los misterios más profundos de nuestro universo es el enigma de su procedencia.

Cuando, a principios de la década de 1950, ingresé en la Universidad de Cambridge como estudiante de grado en matemáticas, se estaba imponiendo una teoría cosmológica fascinante, conocida como el modelo del estado estacionario. Según este esquema, el universo no tuvo principio y permanecía más o menos igual todo el tiempo. El universo en estado estacionario lo conseguía, pese a su expansión, porque la continua dilución de material que resulta de la expansión del universo se considera compensada por la continua creación de nueva materia, en forma de gas hidrógeno extremadamente difuso. Mi amigo y mentor en Cambridge, el cosmólogo Dennis Sciama, de quien aprendí la excitación de tanta nueva física, era en esa época un fuerte defensor de la cosmología de estado estacionario, y él me transmitió la belleza y potencia de ese notable esquema de cosas.

Pero esta teoría no ha soportado la prueba del tiempo. Unos diez años después de que yo hubiera ingresado por primera vez en Cambridge, y me hubiera familiarizado con la teoría, Arno Penzias y Robert Wilson descubrieron, para su propia sorpresa, una radiación electromagnética que impregnaba todo y procedía de todas direcciones, ahora conocida como *el fondo cósmico de microondas* o CMB (de Cosmic Microwave Background). Poco después, Robert Dicke identificó este fondo como una consecuencia predicha del «destello» de un *Big-Bang* origen del universo, que

ahora se supone que tuvo lugar hace unos 14.000 millones de años —un suceso que había sido concebido seriamente por primera vez por monseñor George Lemaître en 1927, como una consecuencia de su trabajo sobre las ecuaciones de Einstein de la relatividad general y los primeros indicios observacionales de una expansión del universo—. Haciendo gala de gran valor y honestidad científica (cuando los datos del CMB quedaron mejor establecidos), Dennis Sciama repudió públicamente sus ideas anteriores y pasó a apoyar con fuerza la idea del Big Bang origen del universo.

Desde entonces, la cosmología ha madurado desde una búsqueda especulativa hasta una ciencia exacta, y el análisis intenso del CMB —procedente de datos muy detallados, generados por soberbios experimentos— ha formado una parte importante de esta revolución. Sin embargo, quedan muchos misterios, y mucha especulación sigue formando parte de esta empresa. En este libro ofrezco descripciones no sólo de los principales modelos de la cosmología relativista clásica sino también de varios desarrollos y cuestiones enigmáticas que han surgido desde entonces. Muy en particular, hay una profunda singularidad subyacente en la Segunda Ley de la termodinámica y la propia naturaleza del Big Bang. En relación con esto, presento un cuerpo de especulación propia, que reúne muchas hebras de diferentes aspectos del universo que conocemos.

Mi propia aproximación heterodoxa data del verano de 2005, aunque muchos detalles son más recientes. Esta exposición entra seriamente en la geometría, pero en el cuerpo principal del texto he evitado incluir algo serio en forma de ecuaciones u otros tecnicismos, que han sido relegados a los apéndices. Sólo los expertos son remitidos a esas partes del libro. El esquema que voy a defender es en verdad heterodoxo, pero está basado en ideas geométricas y físicas que están muy firmemente fundamentadas. Aunque es algo completamente diferente, ¡hay en esta propuesta fuertes ecos del viejo modelo del estado estacionario!

Me pregunto qué le hubiera parecido a Dennis Sciama.

## Agradecimientos

Estoy muy agradecido a muchos amigos y colegas por sus importantes aportaciones, y por compartir conmigo sus ideas respecto al esquema cosmológico que presento aquí. Especialmente importantes han sido las discusiones detalladas con Paul Tod, concernientes a la formulación de su propuesta de una versión de extensión conforme de la hipótesis de curvatura de Weyl, que han tenido una influencia crucial; y muchos aspectos de su análisis se han mostrado vitales para el desarrollo detallado de las ecuaciones de la cosmología cíclica conforme, tal como las presento aquí. En el otro extremo, el potente análisis de Helmut Friedrich del infinito conforme, en especial su trabajo sobre el caso en donde hay una constante cosmológica positiva, ha prestado un fuerte apoyo a la viabilidad matemática de este esquema. Otra persona que ha hecho una aportación importante durante muchos años es Wolfgang Rindler, en especial por su seminal comprensión de los horizontes cosmológicos, pero también por su larga colaboración conmigo sobre el formalismo de 2-espinores, y también por discusiones sobre el papel de la cosmología inflacionaria.

Aportaciones significativas proceden de Florence Tsou (Sheung Tsun) y Hong-Mo Chan, que han compartido conmigo sus ideas sobre la naturaleza de la masa en la física de partículas; también James Bjorken ofreció una idea crucial en relación con esto. Entre otros muchos que han tenido una importante influencia sobre mí hay que citar a David Spergel, Amir Hajian, James Peebles, Mike Eastwood, Ed Spiegel, Abhay Ashtekar, Neil Turok, Pedro Ferreira, Vahe

Gurzadyan, Lee Smolin, Paul Steinhardt, Andrew Hodges, Lionel Mason y Ted Newman. El heroico apoyo editorial de Richard Lawrence ha sido impagable, como la aportación vital de Thomas Lawrence al proporcionar mucha información que faltaba, concerniente en particular a la Parte 1. Hay que dar las gracias a Paul Nash por haber hecho un índice.

Por su gran apoyo, amor y comprensión, frecuentemente en difíciles circunstancias, estoy en deuda profunda con mi mujer Vanessa, a quien también agradezco el haber proporcionado casi al instante algunas gráficas necesarias, pero más en particular por guiarme a través de algunas de las continuas frustraciones de la moderna tecnología electrónica, que de no ser por ella me habrían hecho rendirme ante la elaboración de los diagramas. Finalmente, también hay que dar las gracias a nuestro hijo Max, de diez años de edad, no sólo por su continuo ánimo y cariño, sino también por desempeñar su propio papel en la ayuda ante esta desconcertante tecnología.

Estoy agradecido a la M. C. Escher Company, Holanda, por el permiso para reproducir las imágenes utilizadas en la Fig. 2.3. Gracias también al Instituto de Física Teórica de la Universidad de Heidelberg, por la Fig. 2.6. Doy la gracias, además, a la NSF por su apoyo económico bajo PHY00-90091.

## Prólogo

Con los párpados medio cerrados, calado por la lluvia y sintiendo en los ojos el picor de las finas gotas de agua procedentes de la nube que se formaba sobre el río, Tom observaba el torrente turbulento que descendía por la ladera de la montaña.

—¡Impresionante! —dijo dirigiéndose a su tía Priscilla, una catedrática de astrofísica de la Universidad de Cambridge, que le había llevado a este maravilloso molino antiguo en excelente estado de conservación—, ¿siempre es así? No me extraña que esta vieja maquinaria pueda seguir dando vueltas a una velocidad tan grande.

—No creo que siempre lleve tanta energía —dijo Priscilla, que permanecía junto a él tras la barrera a la orilla del río, elevando algo su voz para hacerse oír por encima del ruido del agua rugiente—. El agua está hoy mucho más violenta que de costumbre a causa de este tiempo lluvioso. Ya ves que ha habido que desviar buena parte del agua para que no llegue al molino. En circunstancias normales no se haría, porque habría que aprovechar al máximo un flujo mucho más tranquilo. Pero ahora el flujo lleva mucha más energía que la que se necesita para mover el molino.

Tom observó durante algunos minutos el agua tumultuosa y admiró las complicadas figuras que formaban los vapores cuando ascendían en el aire.

—Puedo ver que hay mucha energía en el agua, y sé que hace un par de siglos la gente era suficientemente inteligente para ver cómo se podía utilizar toda esta energía para impulsar estas máquinas, que realizaban el trabajo de



muchos seres humanos y tejían todos esos tejidos de lana. Pero ¿de dónde procedía inicialmente la energía que llevó toda esa agua a lo alto de la montaña?

—Fue el calor del Sol el que hizo que el agua de los océanos se evaporara y ascendiera, de modo que con el tiempo volvió a caer en forma de lluvia. Y una buena proporción de la lluvia se depositó en lo alto de las montañas —respondió Priscilla—. En realidad es la energía del Sol la que se está aprovechando para mover el molino.

Tom se sintió un poco intrigado por esto. A menudo se sentía intrigado por las cosas que le contaba Priscilla, y era bastante escéptico por naturaleza. Realmente no podía ver cómo el calor podía elevar el agua en el aire. Y si había tanto calor, ¿por qué él sentía frío ahora?

Ayer hacía calor —concedió a regañadientes. Aunque, aún incómodo, comentó—: Pero yo no sentía que el Sol tratara de levantarme en el aire más de lo que lo siento ahora.

La tía Priscilla se rió.

—No, no es realmente así. Son las minúsculas moléculas del agua en los océanos las que se hacen más energéticas gracias al calor del Sol. Por eso, dichas moléculas se mueven aleatoriamente mucho más rápidas que lo harían de lo contrario, y unas pocas de esas moléculas «calientes» se moverán tan rápidas que se despegarán de la superficie del agua y se elevarán en el aire. Y aunque son relativamente pocas las moléculas que ascienden en un instante, los océanos son tan grandes que realmente habrá una gran cantidad de agua ascendiendo en conjunto. Esas moléculas forman las nubes, y finalmente las moléculas de agua vuelven a caer en forma de lluvia, buena parte de la cual cae en lo alto de las montañas.

Tom se sentía aún bastante incómodo, pero al menos la lluvia había amainado algo.

—Pero esta lluvia no me parece nada caliente.

—Piensa que la energía del Sol se convierte inicialmente en la energía del movimiento aleatorio rápido de las moléculas de agua —dijo la tía Priscilla—. Piensa luego que ese movimiento rápido da como resultado que una pequeña proporción de las moléculas sean tan rápidas que se elevan en forma de vapor de agua. La energía de estas moléculas se convierte en lo que se denomina energía potencial gravitatoria. Piensa en lo que pasa cuando arrojas una bola al aire. Cuanto mayor es la energía con la que la lanzas, más alto sube. Pero cuando alcanza la altura máxima, deja de subir. En ese momento toda su energía de movimiento se ha transformado en energía potencial gravitatoria correspondiente a su altura sobre el suelo. Lo mismo sucede con las moléculas de agua. Su energía de movimiento (la energía que obtuvieron del calor del Sol) se convierte en esa energía potencial gravitatoria, ahora en la cima de la montaña, y cuando corre hacia abajo, esta energía potencial se convierte de nuevo en energía cinética de movimiento, que se utiliza para mover el molino.

—Entonces, ¿el agua no está caliente en absoluto cuando está allí arriba? —preguntó Tom.

—Exactamente, querido. Cuando esas moléculas llegan a una gran altura en el cielo, se frenan y con frecuencia se congelan en minúsculos cristales de hielo (de eso están hechas la mayor parte de las nubes), de modo que la energía entra en su altura sobre el suelo antes que en su movimiento térmico. Como consecuencia, la lluvia no está caliente allí, e incluso está bastante fría cuando finalmente empieza a caer de nuevo, frenada por la resistencia del aire.

—¡Eso es sorprendente!

—Si, realmente lo es. —Y, animada por el interés del muchacho, la tía Priscilla aprovechó la oportunidad para seguir diciendo—: ¿Sabes?, lo curioso es que incluso en el agua *fría* en este río sigue habiendo mucha más energía *térmica* en el movimiento de las moléculas individuales que se mueven aleatoriamente a gran velocidad que la que hay

en las corrientes turbulentas de agua que descienden por la ladera de la montaña.

—¡Anda ya! ¿Se supone que tengo que creermelo?

Tom reflexionó durante unos minutos, algo confundido al principio; pero luego, más atraído por lo que Pricilla decía, comentó excitado:

—¡Me has dado una gran idea! ¿Por qué no construimos un tipo de molino especial que utilice directamente toda la energía de las moléculas del agua en un lago ordinario? Podría utilizar montones de minúsculos molinillos, quizá como esos molinillos que giran en el viento, con pequeñas capuchas en los extremos para que puedan girar y ponerse siempre en la dirección del viento, venga de donde venga. Solo que en este caso tendrían que ser pequeñísimos y estar dentro del agua, de modo que fuera la velocidad de las moléculas del agua lo que los hiciera girar, y así podrían utilizarse para aprovechar la energía del movimiento en las moléculas de agua para impulsar todo tipo de máquinas.

—Ésa es una idea maravillosa, querido Tom, ¡solo que por desgracia no funcionaría! La razón está en un principio físico fundamental conocido como Segunda Ley de la termodinámica, que más o menos dice que las cosas se hacen cada vez más desorganizadas con el paso del tiempo. Más en concreto, dice que no se puede sacar energía útil de los movimientos *aleatorios* de un cuerpo caliente (o frío). Me temo que lo que estás sugiriendo es lo que se llama un «demonio de Maxwell».

—¡No empieces con eso! Sabes que el abuelo siempre me llamaba «pequeño demonio» cuando tenía una buena idea, y a mí no me gustaba. Y esa Segunda Ley no es una ley muy bonita —se quejó Tom de mal humor. Luego recuperó su escepticismo natural—: Y en cualquier caso no estoy seguro de que pueda creérmela. —Después continuó —: Creo que leyes como ésa sólo necesitan ideas inteligentes para superarlas. En cualquier caso, pensaba que tú habías dicho que es el calor del Sol el responsable de calentar

los océanos, y que es esa energía del movimiento *aleatorio* la que sube a la cima de las montañas, y eso es lo que mueve el molino.

—Sí, tienes razón. Así que la Segunda Ley nos dice que el calor del Sol por sí solo no haría el trabajo. Para que funcione, también necesitamos que la alta atmósfera esté más fría, para que el vapor de agua pueda condensarse sobre la montaña. De hecho, la Tierra en conjunto no obtiene ninguna energía del Sol.

Tom miró a su tía con una expresión interrogativa.

—¿Qué tiene que ver la alta atmósfera fría con todo esto? ¿No significa «frío» que no hay tanta energía como en «caliente»? ¿De qué sirve un poco de «no tanta energía»? No entiendo lo que estás diciendo. Me parece que te estás contradiciendo —dijo Tom con aplomo—. Primero me dices que la energía del Sol mueve el molino, y ahora me dices que el Sol no cede energía a la Tierra después de todo.

—Es verdad, no lo hace. Si lo hiciera, la Tierra se calentaría cada vez más a medida que ganara energía. La energía que la Tierra obtiene del Sol durante el día tiene que volver al espacio finalmente, y lo hace debido al cielo frío nocturno; salvo que, supongo, con el calentamiento global una pequeña parte de la misma vuelve a la Tierra. Por eso el Sol es un punto muy caliente en un cielo por lo demás oscuro y frío...

Tom empezaba a perder el hilo de lo que ella estaba diciendo y su mente empezó a divagar. Pero le oía decir:

—... de modo que es la *organización* manifiesta en la energía del Sol la que nos permite mantener a raya la Segunda Ley.

Tom miró a la tía Priscilla, casi totalmente desconcertado.

—No creo que pueda entender todo eso —dijo—, y no veo por qué tengo que creerme esa «Segunda Ley». Además, ¿de dónde viene toda esa organización del Sol? Tu Segunda Ley debería decirnos que el Sol se hace cada vez

más desorganizado con el paso del tiempo, de modo que tendría que haber estado enormemente organizado cuando se formó inicialmente, puesto que continuamente está desprendiendo organización. Tu «Segunda Ley» nos dice que su organización se está perdiendo continuamente.

—Eso tiene que ver con el hecho de que el Sol es un punto caliente en el cielo oscuro. Ese desequilibrio extremo de temperatura proporcionó la organización necesaria.

Tom miró fijamente a la tía Priscilla, sin entender ahora nada de lo que ella le estaba diciendo.

—Me dices que eso cuenta como organización; bueno, no veo por qué debería contar. Supongamos que de algún modo lo hace, pero entonces todavía tendrías que decirme de dónde procede ese curioso tipo de organización.

—Procede del hecho de que el gas a partir del cual se condensó el Sol estaba antes uniformemente disperso, y la gravedad pudo hacer que se formasen grumos que se condensaron gravitatoriamente en estrellas. Hace muchísimo tiempo el Sol hacía precisamente eso; se condensaba a partir de ese gas inicialmente disperso, y se hacía cada vez más caliente en el proceso.

—Sigues diciéndome una cosa detrás de otra, retrocediendo en el tiempo, pero ¿de dónde procedía *originalmente* eso que llamas «organización», sea lo que sea?

—En última instancia procede del Big Bang, que fue lo que puso en marcha el universo entero con una tremenda explosión.

—No parece que una tremenda explosión sea algo muy organizado. Para mí no lo es.

—¡No eres el único que piensa así! Estás en buena compañía si no lo crees. Nadie lo cree *realmente*. Uno de los mayores enigmas de la cosmología es de dónde procede la organización, y en qué forma el Big Bang representa organización.

—¿No podría haber algo *más* organizado *antes* del Big Bang? Eso podría explicarlo.

—La gente ha tratado de sugerir cosas como ésa durante algún tiempo. Hay teorías en las que nuestro universo actualmente en expansión tuvo una fase de colapso anterior que «rebotó» para convertirse en nuestro Big Bang. Y hay teorías en las que pequeños fragmentos de una fase anterior del universo colapsaron en objetos que llamamos agujeros negros, y esos fragmentos «rebotaron» para convertirse en nuevas semillas de montones y montones de nuevos universos en expansión, y hay otras en donde brotan nuevos universos a partir de cosas llamadas «falsos vacíos»...

—Todo eso suena completamente descabellado para mí —dijo Tom.

—Y, ¡ah sí!, existe otra teoría de la que he oído hablar recientemente...

—————PARTE **1**—————

La Segunda Ley y  
su misterio subya-  
cente