

RELATIVIDAD Y UNIVERSO: Relatividad y Cosmología básicas

Ángel Torregrosa Lillo



*Einstein, cabello y violín,
hacemos nuestra última reverencia;
aunque sólo comprendido por dos personas,
él mismo y, a veces, Dios*

Jack C. Rosseter

(The Mathematics Teacher, noviembre 1950, p. 341)

Título: *Relatividad y Universo: Relatividad y comología básicas*

Autor: © Ángel Torregrosa Lillo

I.S.B.N.: 978-84-8454-920-8

Depósito legal: A-1147-2009

Edita: Editorial Club Universitario Telf.: 96 567 38 45

C/ Cottolengo, 25 – San Vicente (Alicante)

www.ecu.fm

Printed in Spain

Imprime: Imprenta Gamma Telf.: 965 67 19 87

C/ Cottolengo, 25 - San Vicente (Alicante)

www.gamma.fm

gamma@gamma.fm

Reservados todos los derechos. Ni la totalidad ni parte de este libro puede reproducirse o transmitirse por ningún procedimiento electrónico o mecánico, incluyendo fotocopia, grabación magnética o cualquier almacenamiento de información o sistema de reproducción, sin permiso previo y por escrito de los titulares del Copyright

Les dedico este libro a Eva, mi mujer,
y a mis hijos Miguel y María,
que han soportado mis discursos
y mi pasión por la ciencia

Dos de los libros que más han influido en mí han sido “Introducción a la ciencia”, de Georges Gamow, y “El Universo” de Isaac Asimov”. Estos libros me introdujeron una visión del universo de la física diferente de la que se obtiene en la enseñanza formal y académica, y me estimularon inconscientemente a una búsqueda por la comprensión de temas tan complejos como los agujeros negros, la teoría de la relatividad o la forma, estructura y tamaño del universo.

¿Qué sucede si caes en un agujero negro? ¿Cómo es de grande nuestro universo? ¿Se puede detener el tiempo? ¿Qué es el espaciotiempo? ¿Por qué los cuerpos se atraen? ¿Tiene solución la paradoja de los gemelos? Hay muchas preguntas que perturban una mente inquieta y con ansias de comprender, y que abren un camino hacia el estudio, la lectura y la búsqueda de conocimiento.

Este libro pretende acercar años de aprendizaje y búsqueda a quien desee traspasar esa puerta de la curiosidad y el deseo de comprender el universo.

Este libro surge como una gran ampliación, reestructuración y corrección de otro que publiqué en 2002 “Relatividad fácil”, cuyo germen fue la unión de tres artículos que realicé con la intención de divulgar estos temas tan atractivos como confusos para la mayoría (agujeros negros, teoría de la relatividad, cosmología), tratando de evitar que se convirtiera en un texto típico en el que te encuentras constantemente frases del tipo “se deduce que ...” o “fulanita dedujo que ...” en todo lo que he podido, pero a la vez he tratado de evitar un documento puramente científico plagado de cálculos tensoriales ininteligibles, de modo que espero que con unos conocimientos de física de bachillerato o primero de universidad sea suficiente para entender incluso las deducciones más complicadas del texto.

Por otro lado cualquiera puede leerlo saltándose las demostraciones y aún así creo que puede resultar interesante. Debo decir aquí que a pesar de que he puesto la teoría de la relatividad al principio, es bastante probable que la mayoría prefiera empezar la lectura por el bloque de agujeros negros o tal vez el de “reflexiones” o el de cosmología.

Espero que este trabajo contribuya en algo a la divulgación y comprensión de un tema tan apasionante.

Ángel Torregrosa Lillo

ÍNDICE

PRÓLOGO: En las orillas de mundos infinitos	13
PREFACIO	25
SECCIÓN 1: La relatividad en pocas palabras	27
1- El éter, las experiencias de Fizeau y Michelson, y las teorías de Lorentz	27
2- Einstein y la relatividad	33
3- La gravedad: teoría de la relatividad general	38
4- Paradojas y conclusiones	45
SECCIÓN 2: Profundizando en relatividad especial	47
5- Derivación de las transformadas de Lorentz al estilo Einstein	47
6- Una deducción sencilla de las transformadas de Lorentz y dos usos	50
7- Teorema de adición de velocidades	55
8- Test de Fizeau: Medición de la luz en agua en movimiento	56
9- El espacio en cuatro dimensiones, masa y energía: $E=Mc^2$	59
10- La paradoja de los gemelos explicada con líneas de universo	65
11- El problema de la simultaneidad	69
12- El efecto Doppler	71
13- Profundizando en el efecto Doppler, Doppler oblicuo, Transversal, La aberración y las pruebas empíricas	74
14- Fuerzas en relatividad especial	77
SECCIÓN 3: Profundizando en relatividad general	81
15- Un punto de vista más moderno para la gravedad: La métrica de Schwarzschild	81
16- Frenando a la luz	83
17- Tiempo propio en órbitas circulares, y detención del tiempo	87
18- Contracción de longitudes en la relatividad general	90
19- Ondas gravitacionales	92

20- Los GPS y la relatividad	94
21- Mercurio y la precesión anómala del perihelio de su órbita	96
SECCIÓN 4: Los agujeros negros	99
22- Introducción a los agujeros negros	99
23- Como se forman los agujeros negros	100
24- La teoría de la relatividad especial y los agujeros negros	101
25- La relatividad general y los agujeros negros	104
26- Detección de agujeros negros	106
27- El agujero negro no puntual	108
28- Gráficos de una estrella colapsando	112
29- Agujeros en eterna formación, agujeros negros eternos y otros conceptos matemáticos	114
30- Agujeros en rotación (de Kerr) y arrastre del espacio (Frame Dragging)	116
SECCIÓN 5: Introducción a la cosmología (Universo plano o no plano)	117
31- Introducción	117
32- La expansión del universo, el Big Bang, la edad del universo y el paradigma del espacio en expansión	118
33- La expansión del universo. Algunas preguntas y respuestas	122
34- Modelos básicos de universo newtoniano	130
35- El principio cosmológico (PC)	132
36- Dedución de la densidad crítica	133
37- El universo inflacionario y otros modelos según densidades	136
38- Introducción a la cosmología relativista, geometría del universo y concepto de curvatura	142
SECCIÓN 6: Reflexiones sobre relatividad y cosmología y anexos	147
39- La métrica de Robertson-Walker, profundizando y fusionando relatividad y cosmología	147
40- Consecuencias del paradigma del universo en expansión. Modelo de expansión constante	150
41- Modelando el caso de universo de expansión constante y calculando el radio del universo y su volumen	153
42- ¿Son posibles los universos infinitos?	157
43- La radiación de fondo de microondas, su anisotropía y los sistemas de referencia	161

44- El efecto Sagnac y sus consecuencias	165
45- El significado de la cuarta transformada de Lorentz. Sincronizando relojes	169
46- El principio de relatividad	175
47- Buscando sistemas inerciales	177
48- Un debate sobre la paradoja de los gemelos	179
49- Una experiencia y tres puntos de vista. Dos naves en direcciones opuestas	191
PARA SABER MÁS	195
BIBLIOGRAFÍA	197
AGRADECIMIENTOS	199

PRÓLOGO:

EN LAS ORILLAS DE MUNDOS INFINITOS

Hay ocasiones en las que una petición recibida, deja de ser un mero compromiso para transmutarse a la vez en un honor y un placer. En ese caso me encuentro gracias a mi amigo Ángel Torregrosa Lillo, quien me ha honrado proponiéndome escribir un prólogo para este libro que el amable lector tiene en sus manos, *Relatividad y Universo*. En esta magnífica obra –destinada sin duda a convertirse en un clásico de la divulgación en su campo– se despliegan ante nosotros los rudimentos de una de las grandes revoluciones en la física del siglo XX, la Relatividad de Einstein, ni más ni menos. El perfil de un sabio con el pelo ensortijadamente revuelto y mirada absorta en el horizonte de sus inabarcables pensamientos, constituye ya un icono inconfundible en la historia de la ciencia. La silueta del Einstein maduro, triunfante en su carrera profesional y defensor de las libertades públicas contra los totalitarismos de toda laya, sin duda se preserva en la mente de la mayoría de nosotros como una imagen arquetípica del sabio entrañable.

Pocos de sus admiradores, sin embargo, conocen la obra del gigante intelectual que con tanta justicia reverencian. Cuando se habla de relatividad, no son muchos los que pueden emitir algo más que comentarios vagos e inconcretos. No es este el caso, desde luego, de Ángel Torregrosa, uno de los primeros autores en lengua española de una página en Internet dedicada a la relatividad y los agujeros negros. De sus reflexiones y debates surgió la idea de elaborar este texto, en el que se esbozan las líneas maestras de la teoría relativista de Einstein, un auténtico revulsivo para nuestras más caras intuiciones sobre el tiempo, el espacio y el movimiento. Un debate multiseccular cuyas raíces retroceden hasta los tiempos de Aristóteles y aún antes.

El genio de Isaac Newton comenzó a poner un poco de orden en el paisaje de la estéril escolástica medieval, sentando con ello las bases de una mecánica racional que llegaría a serlo plenamente sólo en las manos de los geómetras del siglo XVIII (Euler, los Bernouilli, etc.). Las tres leyes del movimiento de Newton más la gravitación universal, se alzaron durante más de doscientos

años como un paradigma de perfección envidiado por cualquier otra parcela de la física. Pero los descubrimientos de la óptica y el electromagnetismo socavaron la confianza en la robustez de sus premisas. A caballo entre los siglos XIX y XX quedó claro que las leyes newtonianas de movimiento resultaban incompatibles con la teoría electromagnética, y fue el acerado intelecto de Einstein el que comprendió cuál era la salida lícita de aquel laberinto.

Ocurría que las leyes de la mecánica clásica obedecían unas ciertas transformaciones de coordenadas que permitían pasar desde unos sistemas de referencia inerciales a otros (transformaciones de Galileo). Ahora bien, las transformaciones de coordenadas para las ecuaciones electromagnéticas eran distintas entre dichos sistemas inerciales de referencia (transformaciones de Lorentz). Einstein fue quien primero comprendió que las transformaciones de Lorentz habían de regir siempre y en todos los casos, modificando sustantivamente nuestras concepciones sobre el espacio, el tiempo y todas sus magnitudes derivadas. Así nació en 1905 la Relatividad Especial, posteriormente reforzada por el formalismo de cuatro dimensiones, mediante el cual el espacio y el tiempo se fundían en un andamiaje de espacio-tiempo, introducido por un antiguo profesor de Einstein, Hermann Minkowski.

Dado que en los tiempos del genio alemán tan solo se conocían dos fuerzas fundamentales, la electromagnética y la gravitatoria, parecía lógico que tras formular la relatividad Especial, Einstein tratase de insertar la gravitación en el nuevo marco espacio-temporal relativista. Tras una furiosa pugna científica con los numerosos y tremendos obstáculos hallados en su camino, el resultado final culminó en 1915 con la Relatividad General, la teoría relativista de la gravedad. Einstein creyó en un principio que la Relatividad General relativizaba los movimientos inerciales y no inerciales en el mismo sentido que la Relatividad Especial lo había hecho con el movimiento inercial y el reposo. Se equivocaba; como después señalaría el físico ruso Valdimir Fok, los movimientos inerciales (líneas espacio-temporales rectas) seguían siendo en la relatividad general tan distinguibles de los movimientos inerciales (trayectorias espacio-temporales curvas) como siempre. Sin embargo, la importancia capital de la nueva teoría relativista de Einstein se puso de manifiesto con su aplicación al universo en su conjunto. Siendo la gravedad la fuerza dominante en las escalas cósmicas, no era de extrañar que la relatividad general deviniese pronto en el fundamento de la cosmología científica, así nacida a comienzos del siglo XX.

La física relativista, además de ingrediente indispensable en la construcción de una imagen científica del mundo, sigue hoy tan viva y abierta a las investigaciones como en los tiempos de su nacimiento. El problema del tiempo, el origen y destino del universo, el conjunto de posibles soluciones de las ecuaciones

gravitatorias de Einstein, y muy especialmente su combinación con la teoría cuántica, permanecen como fronteras del conocimiento desafiando el tesón de los eruditos a cuya indagación deciden entregar sus energías. Muchos de estos temas son abordados en el libro de Ángel Torregrosa, y otros muchos por falta de espacio se insinúan sin desmerecer su importancia, razón por la cual valdrá la pena comentarlos aquí someramente.

El concepto físico de tiempo

El problema del tiempo comenzó hace un siglo, cuando las Teorías de la Relatividad Especial y General de Einstein derrocaron la idea del tiempo como una magnitud uniforme en todo el universo. Una consecuencia es que pasado, presente y futuro no son absolutos. Las teorías de Einstein también abrieron una grieta en la física debido a que las reglas de la relatividad general (que describen la gravedad y la estructura a gran escala del cosmos) parecen incompatibles con las de la física cuántica (que gobierna el dominio de lo diminuto). Unas cuatro décadas más tarde, el renombrado físico John Wheeler, entonces en Princeton, y el posteriormente Bryce DeWitt, entonces en la Universidad de Carolina del Norte, desarrollaron una extraordinaria ecuación que proporciona un posible marco de trabajo para unificar la relatividad y la mecánica cuántica. Pero la ecuación de Wheeler-DeWitt siempre ha sido controvertida, en parte debido a que añade otro giro si cabe aún más desconcertante al asunto, ya que parece convertir la variable tiempo en algo superfluo de lo que puede prescindirse.

Hay un dominio temporal llamado escala de Planck, donde incluso los attosegundos parecen eones. Esto marca el límite de la física conocida, una región donde las distancias e intervalos son tan cortos que los mismos conceptos de espacio y tiempo comienzan a colapsar. El tiempo de Planck —la unidad más pequeña de tiempo que tiene sentido a nivel físico— es 10^{-43} segundos, menos de una billonésima de billonésima de un atto-segundo. ¿Más allá qué hay? Lo desconocido, al menos por ahora. Los esfuerzos por comprender el tiempo por debajo de la escala de Planck han llevado coyunturas extremadamente extrañas de la física. El problema, en síntesis, es que el tiempo puede no existir en el nivel más fundamental de la realidad física. Si esto es así, entonces, ¿qué es el tiempo? ¿Y por qué es tan obvia y tiránicamente omnipresente en nuestra propia experiencia?

¿Qué hubo antes del Big Bang?

En principio esa pregunta carece de sentido, puesto que en el Big Bang nació también la magnitud tiempo, de modo que no pudo existir un “antes” del Big Bang. Sin embargo, una tentativa de combinar la relatividad general

con la física cuántica, llamada gravedad cuántica de bucles (LQG en inglés) podría dar un nuevo sentido a la cuestión.

La LQG es una de las teorías que aspiran a unificar la mecánica cuántica y la gravedad relativista, como la más popular *Teoría de Supercuerdas*. La Gravedad cuántica de bucles se llama así por perseguir la unificación de ambas teorías y por considerar que el propio espacio-tiempo está cuantizado en una especie de “lazos” o “bucles” de unos 10^{-35} metros de tamaño y entrelazados unos con otros, representados matemáticamente por operadores relacionados con las llamadas *redes de espín*. Esta teoría aún no ha sido completada, pero sigue avanzando y puede convertirse en un rival de consideración para los otros modelos de gravedad cuántica.

De acuerdo con la teoría de Einstein, el Big Bang es una singularidad de densidad infinita. Siendo así, no existe conexión teórica posible entre lo que ocurrió después y lo que sucedió antes: nuestras leyes físicas se colapsan justo en el momento del Big Bang. De hecho, no tendría ni siquiera sentido hablar de un “antes del Big Bang”. Sin embargo, añadiendo la cuántica a la gravedad relativista, el modelo de la LQG predice que en el momento del Big Bang el volumen, aunque es muy pequeño, no es cero, y la densidad, a pesar de ser muy grande, no es infinita. Dicho de otra manera, de acuerdo con la LQG el Big Bang no fue una singularidad.

Ondas gravitatorias

Una de las predicciones de la teoría de la gravitación de Einstein es que toda variación brusca de la distribución de masa provocará variaciones en la configuración local del espacio-tiempo que se propagarán en forma de ondas gravitacionales. Tales ondas, arrugas en la curvatura del espacio-tiempo deben emitir las masas en movimiento acelerado, de manera análoga a como las ondas electromagnéticas son emitidas por cargas eléctricas sometidas a una aceleración. La producción de ondas gravitacionales se asemeja, pues, a la producción de ondas electromagnéticas. Un objeto cargado eléctricamente y en movimiento radia ondas electromagnéticas con amplitud proporcional a su carga eléctrica y a su aceleración. La carga gravitatoria de un objeto es su masa; y así, la amplitud de una onda gravitacional será proporcional a la masa del objeto y a su aceleración. La teoría general de la relatividad de Einstein sugiere que la Tierra se halla inmersa en un baño continuo de energía procedente de la interacción gravitatoria de estrellas y objetos celestes distantes. De acuerdo con esta teoría, la energía liberada por una gran perturbación cósmica, como pueda ser la explosión de una estrella, se propaga en forma de ondas gravitacionales que, en su avance, distorsionan la morfología de cualquier región del

espacio-tiempo que atravesen. Ante tales perturbaciones el espacio-tiempo, literalmente, tiembla. Fuentes estelares de ondas gravitacionales, las estrellas y otros objetos astronómicos deben emitir, pues, ondas gravitacionales.

La observación y la medición directa de ondas gravitacionales es uno de los desafíos más importantes de la física actual. Permitirá, entre otras cosas, desvelar la fracción hasta ahora inobservada del Universo constituida por la denominada materia oscura una fracción nada desdeñable del 96%. Además del acceso a la materia oscura, hará posible la observación de agujeros negros y aportará nuevos detalles al estudio del eco de la Gran Explosión. El panorama del Universo que presumiblemente revelará la detección de las ondas gravitacionales ampliará notablemente el que ha venido ofreciendo la astronomía tradicional. Hasta la década de 1930, las ondas electromagnéticas de frecuencia óptica (luz visible) constituían la única ventana posible para observar el Cosmos. La exploración adquirió un impulso espectacular con la llegada de la radioastronomía; la apertura de las ventanas infrarroja, de rayos X y ultravioleta trajo consigo nuevos avances, al permitir el acceso a una parte de fenómenos del Universo que hasta entonces resultaban invisibles. Cada forma de radiación electromagnética ofrece una perspectiva nueva del Universo. Las ondas gravitacionales son de una clase totalmente diferente y ofrecerán una imagen completamente nueva del Cosmos. Los observatorios de ondas gravitacionales revolucionarán el panorama actual de la astronomía y de nuestro conocimiento del Universo.

Unificación de las fuerzas fundamentales

A fines del siglo XIX las leyes de la mecánica clásica y el electromagnetismo parecían explicar todos los fenómenos conocidos. Pero en 1895 se descubrieron los rayos X, en 1896 la radiactividad, Thompson observó el electrón en 1897, y esto indicó que había nuevas cosas por descubrir. Aparecieron también algunos problemas teóricos en el electromagnetismo de Maxwell. Un objeto caliente emite radiación electromagnética con una intensidad bien definida para cada frecuencia. La suma de las energías de la radiación en todas las frecuencias era infinita, un resultado absurdo. Max Planck observó entonces que si la energía, en lugar de tener una distribución continua, se emitía en paquetes discretos o cuantos, la suma sería finita y postuló que la radiación electromagnética existe en cuantos de energía. En la teoría cuántica, un campo no sólo está asociado a ondas sino también a partículas; por ejemplo, el campo electromagnético está asociado al fotón.

Así surgió la idea de la dualidad onda-partícula y de la Teoría Cuántica. En este marco se sucedieron varios avances importantes. En 1911 Rutherford

presentó su modelo atómico, semejante al sistema solar: pequeños núcleos de protones y neutrones rodeados de nubes de electrones; en 1913, Bohr explicó el espectro del átomo más sencillo, el hidrógeno. La materia, a nivel microscópico o atómico y nuclear, se modeló en términos de partículas, identificadas por sus propiedades como la masa, carga, momento angular intrínseco o espín, etc. Todas ellas son de naturaleza cuántica, en el sentido de que sólo pueden tomar ciertos valores discretos. La noción de que los átomos, moléculas y núcleos poseen niveles discretos de energía es uno de los conceptos básicos de la Mecánica Cuántica. Con esta nueva concepción de la materia fue posible calcular las propiedades, no sólo de los átomos individuales y sus interacciones con la radiación, sino también de átomos combinados en moléculas. Se hizo evidente que las reacciones químicas se deben a interacciones eléctricas de los electrones y núcleos atómicos.

Otro ingrediente de esta teoría es el resultado de Dirac de 1928 según el cual para cada tipo de partícula cargada (el electrón, por ejemplo) debe haber otra especie con igual masa pero carga opuesta: la antimateria. Cuatro años más tarde la predicción de Dirac fue confirmada cuando se observó la antipartícula del electrón: el positrón. La teoría cuántica de los electrones y los fotones, la electrodinámica cuántica (QED), se usó en los años 20 y principios de los años 30 para calcular varios fenómenos (colisiones de fotones con electrones, de un electrón con otro, la aniquilación o producción de un electrón y un positrón, etc.) y produjo resultados coincidentes con los experimentos. Pero pronto apareció un nuevo problema: la energía del electrón resultaba infinita. Y aparecieron otros infinitos en los cálculos de las propiedades físicas de las partículas. Estos problemas de consistencia interna indicaron que la QED era sólo una aproximación a la teoría completa, válida únicamente para procesos que involucraran fotones, electrones y positrones de energía suficientemente baja Unificación Cuántica y Relativista. La solución al problema de los infinitos apareció a fines de los años 40 y fue consecuencia de otra unificación: la Teoría Cuántica con la Relatividad Especial.

Los principios que sustentan estas dos teorías son casi incompatibles entre sí y pueden coexistir sólo en un tipo muy limitado de teorías. En la mecánica cuántica no relativista era posible imaginar cualquier tipo de fuerzas entre los electrones y los núcleos atómicos, pero esto no es posible en una teoría relativista. Las fuerzas entre partículas sólo pueden aparecer por intercambio de otras partículas, las mensajeras de las interacciones. Una representación intuitiva de la interacción electromagnética cuántica es que los electrones intercambian fotones y así se origina la fuerza electromagnética entre ellos. Las ecuaciones de esta nueva teoría se aplican a campos y las partículas aparecen

como manifestaciones de esos campos. Hay un campo para cada especie de partícula elemental. Hay un campo eléctrico cuyos cuantos son los electrones, un campo electromagnético cuyos cuantos son los fotones. Los electrones libres y en los átomos están siempre emitiendo y reabsorbiendo fotones que afectan su masa y su carga y las hacen infinitas. Para poder explicar las propiedades observadas, la carga y masa que aparecen en las ecuaciones de la teoría cuántica de campos, llamadas desnudas, deben ser infinitas. La energía total del átomo es entonces la suma de dos términos, ambos infinitos: la energía desnuda, que es infinita porque depende de la masa y carga desnudas, y la energía de las emisiones y reabsorciones de fotones, que también es infinita porque recibe contribuciones de fotones de energía ilimitada. Esto sugirió la posibilidad de que estos dos infinitos se cancelaran, dejando un resultado finito. Y los cálculos efectivamente confirmaron la sospecha.

Estos cálculos eran terriblemente complicados, pero Feynman desarrolló un formalismo que permitió simplificarlos notablemente. Los diagramas de Feynman pueden pensarse como la historia real de partículas puntuales que se propagan en el espacio y a lo largo del tiempo, y que se unen y se separan en los puntos de interacción. Las líneas representan trayectorias de partículas y los vértices corresponden a las interacciones. Los infinitos o divergencias se originan en estos vértices. Son molestos pero pueden eliminarse en la QED, y las propiedades físicas resultan bien definidas y finitas. Este proceso de sustracción de infinitos se denomina renormalización. Se usaron estas técnicas para hacer varios cálculos, y los resultados mostraban una coincidencia espectacular con el experimento. Por ejemplo, el electrón tiene un pequeño campo magnético, originalmente calculado en 1928 por Dirac. Sin embargo, aunque los infinitos se cancelan cuando se los trata adecuadamente, el hecho de que aparezcan divergencias produce cierta desconfianza. Dirac se refería a la renormalización como el proceso de barrer los infinitos debajo de la alfombra. El requerimiento de una teoría finita es parecido a otros juicios estéticos que se realizan a menudo en física teórica. Encontrar teorías que no tengan infinitos parece ser un camino apropiado para avanzar en la búsqueda de la teoría final.

La primera teoría unificadora del siglo XX involucró la Relatividad General y el electromagnetismo bajo la suposición de que el número de dimensiones del espacio-tiempo es mayor que cuatro. Poco después de que Einstein publicara su teoría, el alemán Theodoro Kaluza, matemático y filólogo, publicó en 1919 un estudio de las ecuaciones de Einstein generalizándolas para un espacio-tiempo de cinco dimensiones en que la quinta dimensión «extra» se hallaba compactada, es decir, enrollada y comprimida en una circunferencia ultradiminuta. Kaluza supuso que en cada punto del espacio-tiempo tetra-

mensional ordinario había un pequeño círculo, lo mismo que lo hay en cada punto a lo largo de la línea de un cilindro bidimensional. Kaluza intuyó que las interacciones gravitatoria y electromagnética podrían tener un origen común y propuso unificarlas agregando una dimensión espacial. Imaginó que en cinco dimensiones sólo hay gravedad, no hay electromagnetismo.

El resultado fue muy interesante: reducida a cuatro dimensiones, la Relatividad General reproduce las ecuaciones gravitatorias y además otro conjunto de ecuaciones que resultan ser precisamente las del campo electromagnético. Así, la gravedad en cinco dimensiones se divide en gravedad y electromagnetismo en cuatro dimensiones Pero ¿por qué no percibimos la quinta dimensión? Entonces, en el año 1926, aparece el físico sueco Oskar Klein; sus cálculos indicaron que ésta es muy pequeña y está enrollada. Como al mirar un cable de lejos: parece ser una línea, pero si nos acercamos vemos que en realidad se extiende en otra dimensión. Este proceso de enrollar dimensiones se conoce como “compactación”. Con el descubrimiento de las interacciones fuertes y débiles la teoría de Kaluza-Klein perdió mucho de su atractivo: una teoría unificada debería contener cuatro fuerzas, no sólo dos. Las cinco dimensiones eran insuficientes.

El siguiente gran progreso, realizado por la teoría cuántica de campos, fue la unificación del electromagnetismo con la fuerza nuclear débil. Esta fuerza, mucho más débil que la electromagnética pero mucho más intensa que la gravitatoria, se manifiesta especialmente en la transmutación de partículas. Fue postulada inicialmente para explicar el decaimiento beta, un tipo de radiactividad de ciertos núcleos atómicos inestables, en el cual un neutrón se convierte en un protón, un electrón y un antineutrino, mediante un cambio de sabor de un quark. El término sabor es el equivalente de la masa o carga en las otras fuerzas. La fuerza nuclear débil no es tan evidente en nuestra vida cotidiana como las magnéticas, eléctricas o gravitatorias, pero juega un papel decisivo en las cadenas de reacciones nucleares que generan energía y producen los elementos químicos en los núcleos de las estrellas. Esto es algo que ninguna otra fuerza puede explicar. Ni la fuerza nuclear fuerte que mantiene los protones y neutrones unidos en los núcleos, ni la fuerza electromagnética que trata de separar los protones, pueden cambiar las identidades de estas partículas, y la fuerza gravitatoria tampoco puede hacer algo así. Entonces la observación de neutrones que se convierten en protones y viceversa fue lo que puso de manifiesto la existencia de un nuevo tipo de fuerza en la naturaleza.

A fines de los años 50 del pasado siglo, las interacciones débiles se explicaban en el contexto de la teoría cuántica de campos, pero aunque la teoría funcionaba bien para el decaimiento beta, al ser aplicada a otros procesos más

exóticos aparecían nuevamente infinitos; por ejemplo al calcular la probabilidad de colisión de un neutrino con un antineutrino. Los experimentos no podían hacerse porque las energías necesarias superaban las que se podían alcanzar en el laboratorio, pero obviamente los resultados infinitos no podían coincidir con ningún resultado experimental. Estas divergencias ya habían aparecido en QED y se habían solucionado con la renormalización. En cambio, la teoría de Fermi que describía las interacciones débiles no era renormalizable. La solución de estas cuestiones condujo a una nueva unificación. Así como la fuerza electromagnética entre partículas cargadas se debe al intercambio de fotones, una fuerza débil no podía actuar instantáneamente. Weinberg y Salam propusieron la existencia de otras partículas, los gluones W y Z, nuevas mensajeras que se introducían en la teoría como los fotones. Esto no sólo convirtió a la teoría en renormalizable, sino que permitió explicar, además de las interacciones débiles, las electromagnéticas. La nueva teoría unificada se llamó electrodébil. Su verificación experimental llegó mucho después: en 1983 se descubrieron las partículas W y en 1984 la Z, cuyas propiedades habían sido predichas correctamente en 1968. Nuevamente una unificación resolvía problemas y permitía explicar más fenómenos que los contenidos en la teoría previa.

¿Por qué no se separan los protones y no se desintegra el núcleo atómico debido a la fuerza de repulsión eléctrica? Esto se debe a la fuerza nuclear fuerte, una interacción que se extingue más allá de 10^{-13} centímetros, y cuya fuente es una carga figurativamente denominada “color”, que en este caso es de tres tipos: rojo, verde y azul. La fuerza fuerte actúa también entre otras partículas pesadas llamadas hadrones, que proliferaban por los años 60 del siglo XX. Para reducir todo este enorme jardín botánico de partículas y su taxonomía, y en la mejor tradición de explicar estructuras complicadas en términos de constituyentes más simples, Murray Gell-Mann y Zweig propusieron elementos más fundamentales, llamados quarks. Los quarks se aplicaron a una gran variedad de problemas físicos relacionados con las propiedades de los neutrones, protones, mesones, etc. y la teoría funcionaba bastante bien. Pero todos los intentos experimentales de extraerlos de las partículas que supuestamente los contenían, fracasaron. La tarea parecía imposible. Desde que Thompson extrajo los electrones de los átomos siempre había sido posible separar cualquier sistema compuesto, una molécula en átomos o un núcleo en protones y neutrones. Pero parece imposible aislar los quarks. Esta característica fue incorporada en la teoría moderna de las interacciones fuertes, la cromodinámica cuántica, que prohíbe a los quarks quedar libres, mediante un proceso denominado confinamiento.

Las interacciones electrodébil y fuerte se describen actualmente con una teoría cuántica de campos basada en una gran cantidad de partículas, orga-

nizadas en una estructura de simetría llamada grupo basada en la estructura matemática del mismo nombre. De la inmensa cantidad de estructuras posibles, los datos experimentales han permitido seleccionar una, que se conoce como el Modelo Estándar. Las partículas del Modelo Estándar se dividen en dos clases con funciones muy diferentes, de acuerdo a su espín: los bosones, de espín entero, medido en unidades cuánticas, son los mensajeros de las fuerzas; y los fermiones, de espín semientero, constituyen la materia. Una combinación de teoría y experimento conduce a tres grupos de simetría, correspondientes a las tres fuerzas que describe: SU(3) por SU(2) por SU(1). Este modelo matemático explica toda la física de partículas que se ha observado hasta el presente. Sus predicciones han sido confirmadas con asombrosa precisión. El Modelo Estándar y la Relatividad General han superado todas las pruebas a que han sido sometidos. Los físicos experimentales y astrónomos han explicado cada vez mejor coincidencia entre sus resultados y observaciones y las predicciones de estas teorías. Con ellas, las fuerzas fundamentales de la naturaleza se explican, entonces, satisfactoriamente.

Todas las preguntas sobre fuerzas y materia conducen al Modelo Estándar de las partículas elementales y la Relatividad General. Sin embargo éstas, claramente, no pueden constituir la teoría final de unificación. Por un lado, aunque las interacciones nucleares fuertes están incluidas en el Modelo Estándar, aparecen como algo bastante diferente de la fuerza electrodébil, no como parte de una descripción unificada. Además, este modelo contiene muchas características que no están dictadas por principios fundamentales, sino que deben ser tomadas del experimento. Estos rasgos aparentemente arbitrarios incluyen el menú de partículas y simetrías, varias constantes e incluso los propios principios que lo sustentan. Por otro lado, no contiene a la gravedad, que se describe con una teoría muy diferente, la Relatividad General. Esta funciona bien clásicamente, cuando puede ser probada experimentalmente, pero pierde su validez a energías altas.

Se pueden aplicar las ecuaciones de la teoría cuántica de campos a la Relatividad General, pero el resultado es una teoría no renormalizable. Aparecen otros problemas: los agujeros negros, objetos predichos por la relatividad clásica, parecen desafiar los postulados básicos de la mecánica cuántica. Los dos pilares fundamentales de la física del siglo XX, la Relatividad General y la Teoría Cuántica resultan incompatibles en el contexto de las teorías de partículas. Estos son los problemas que intenta resolver la teoría M, y para ello hubo que postular nuevos principios, desarrollar nuevas ideas.

Por las orillas de esos mundos infinitos que la física relativista nos permitió atisbar, ha de conducirnos con pericia inigualable la pluma ágil y certera de

Ángel Torregrosa. En la Agrupación Astronómica de Alicante –heredera y guardiana del legado de aquellas sociedades de filosofía natural cuyos más intrépidos librepensadores promovieron el movimiento de la Ilustración en el siglo XVIII– tenemos la inmensa suerte de contar con un amigo y compañero como Ángel Torregrosa, capaz de pergeñar las páginas que a continuación siguen y aportar su punto de vista personal en ese proceso inacabable de perfeccionamiento del saber humano que llamamos ciencia.

Rafael Andrés Alemañ Berenguer

