

EL SIEMPRE INALCANZABLE SANTO GRIAL: LA TEORÍA DEL TODO

Si en el futuro un historiador tuviera que escribir la historia de la ciencia del siglo XX, sin duda alguna se impresionaría por la cantidad de científicos y sus logros. Tan solo en el campo del átomo, la lista sería extensa.

En 1902, Lord Kelvin presentó el primer modelo del átomo; en 1910, Josep John Thomson identificó el protón; en 1911, Ernest Rutheford descubrió que el átomo estaba formado por un núcleo central rodeado por una nube de electrones; en 1913, Niels Bohr completó el primer modelo de un átomo que tomó en cuenta las implicaciones del *quantum*. En 1920, trabajando separadamente, Heisenberg y Shrödinger sistematizaron la teoría cuántica y Bohr presentó su interpretación de Copenhague; George Gamow propuso un modelo en el que el núcleo atómico recordaba una gota de líquido que se mantenía unida por una especie de tensión superficial; en 1932, James Chadwick descubrió el neutrón, una partícula sin carga eléctrica y con la misma masa del protón y John Cockroft, junto con Ernest Walton, usó el primer acelerador de partículas para dividir el átomo. Así, en menos de 40 años la física de partículas se revolucionó no solo a sí misma sino también nuestra concepción del mundo físico y la tecnología que lo rodea; la astrofísica progresó tanto como la anterior en cuanto al conocimiento concierne. El año clave de la astrofísica pudiera ser 1915, cuando Einstein presentó su

teoría de la relatividad general ante la Academia de Ciencias de Prusia, describiendo que pasa cuando el espacio se distorsiona por la presencia de la materia. Hacia 1916, las implicaciones de la Relatividad General empezaron a aflorar y una mirada de consecuencias teóricas se postularon, entre las cuales se encuentran los agujeros negros y los agujeros de gusano, así como la expansión del universo. En 1919, una de las primeras confirmaciones experimentales de una de las predicciones de la relatividad general, se obtuvo cuando pudo ser medida la curvatura de la luz causada por la gravedad del Sol. La historia cuenta que cuando se efectuó el experimento, Max Planck estuvo toda la noche aguardando los resultados. Al enterarse de esto, Einstein comentó: “El realmente no ha entendido la ciencia... si hubiera entendido la manera en que la teoría de la relatividad explica la equivalencia entre la masa gravitacional y la inercial, se hubiera ido a la cama”.¹ En los años veinte, más y más predicciones fueron confirmadas y quizá la más impresionante fue el descubrimiento por parte de Edwin Hubble de que la Vía Láctea era sólo una entre muchas galaxias en un cosmos que se estaba expandiendo. Este descubrimiento de la expansión del universo no sólo confirmó algunas de las predicciones que la relatividad había sugerido, sino que confirmó la más sorprendente: que el universo había tenido un nacimiento, que fue posteriormente conocido como la Gran Explosión o *big bang*. En la década de los cuarentas, George Gamow y Ralfh Alpher intentaron describir las condiciones cuantitativas del *big bang*, investigando el tipo de interacciones nucleares que debieron haber ocurrido en el nacimiento del universo.

Si nuestro historiador del futuro estudiara el trabajo de Gamow y Alpher, podría deducir que anticipaba dos cosas. Primero, que establecía las bases de lo que vendría a ser la mayor inquietud de los físicos en la segunda mitad del siglo XX. Segundo, ante estas inquietudes, el trabajo experimental que se hizo para resolverlas, aunque muy brillante, hizo parecer que la física estaba estancada. Nuestro historiador quizá cambiaría el tono de su narrativa de triunfal y laudatorio a uno irónico y pesimista. Tal vez escribiría: “mientras que el trabajo de Gamow iluminó los posibles nuevos caminos que la física podría tomar, también estableció un santo grial que los científicos han ambicionado encontrar, pero que como todos los santos griales, demostró ser también muy difícil de encontrar. Hubo muchos falsos principios, muchas tecnologías inasequibles. Pero lo más importante es que lograr la meta ha sido imposible por dos motivos: los conflictos institucionales y el dogmatismo. Pese a sus creencias en la simetría y la simplicidad, los científicos se apoyaron en esquemas elaborados y rehusaron aceptar el sentido común, cuando era el momento para la ciencia de introducirlo en sus métodos. Más aun, se cegaron o restringieron por sus métodos y no pudieron ver las pistas obvias que podrían haberlos llevado al logro de su meta.”

Nuestro imaginario historiador del futuro debería, por supuesto —como los historiadores de todas las épocas—, contar con el beneficio de mirar el pasado con lo que conocemos como una visión de 20/20, perfecta. Sin embargo la pregunta sería ¿porqué la física nos ha ofrecido tan triste visión en sus conclusiones en la última parte del siglo XX? Después de todo la física de partículas y la astrofísica han

experimentado tremendos avances. El más reciente a punto de resolverse es el valor de omega, el número que determinará la cantidad de materia existente en el universo y que nos dirá si éste se expandirá indefinidamente o eventualmente se colapsará. En 1998 se hizo también un descubrimiento importante: Λ , una insospechada fuerza que controla la expansión del universo.

Por otra parte, la física de partículas ha venido a ser una parte intrínseca de nuestras vidas. Aun pensando que la mayoría de la gente la perciba como un rompecabezas para los académicos en sus torres de marfil, la física cuántica ha transformado nuestro ambiente y nuestro modo de vida, desde lo más trivial hasta lo más comercial. En la vida doméstica, la TV, los equipos de sonido y las computadoras no existirían sin el *quantum*. Todos estos aparatos y hasta los autos, dependen de los semiconductores, materiales con propiedades conductivas que se encuentran entre los aisladores y los conductores y en los que los electrones pueden saltar de un átomo al siguiente si se dan las condiciones adecuadas. Estos saltos de átomo a átomo dependen de una serie de reglas cuánticas conocidas como estadísticas Fermi-Dirac; sin ellas, nadie hubiera sido capaz de construir las veloces computadoras que tenemos actualmente. Claro que podríamos pensar que tanto la TV como las computadoras y los equipos de sonido son simplemente triviales. La civilización se ha manejado sin ellos por milenios, luego ¿son realmente tan importantes?

Como quiera que sea, puesto que el *quantum* está empotrado en la naturaleza, nos permitirá entender no solamente el comportamiento de lo inanimado, sino también los fenómenos sin los

cuales nuestra existencia no sería posible. Debido a la incertidumbre cuántica, podemos entender como en el Sol –nuestra única fuente de energía– los núcleos de hidrógeno se fusionan generando calor. También por la física cuántica podemos entender como la molécula de ADN se replica a sí misma. La vida en este planeta depende en gran medida de la capacidad de ésta molécula para “desabrocharse” y hacer dos copias de la doble hélice original construyendo una contraparte de cada rama de la molécula original con ésta como modelo. Las uniones o enlaces que utiliza este proceso para mantener las ramas de la molécula juntas la mayoría del tiempo, pero que también les permite separarse cuando es necesario o apropiado, es una especie de ligadura química conocida como ligadura de hidrógeno. Esta ligadura, un solo protón, comparte los electrones de otros dos átomos y forma la liga entre ellos. Para decirlo brevemente, la física cuántica explica el misterio fundamental de la vida por medio de un proceso cuántico que está en el corazón de los sistemas de ligadura de hidrógeno.

Por lo tanto, si astrofísicos y físicos de partículas han logrado tales avances y nos han dado un entendimiento mucho más profundo del mundo en que vivimos, ¿por qué las quejas de nuestro imaginario historiador? El camino que en los años cuarenta iniciaron Gamow y Alpher, fue el que se dirigió a lo que se conoce como la teoría del todo. No se debe confundir esta teoría con las grandes teorías unificadas que sólo intentan combinar la descripción de la fuerza electromagnética, la fuerza nuclear débil y la fuerza nuclear fuerte en un sólo paquete matemático similar al que James Clerk Maxwell encontró para unificar las fuerzas eléctrica y magnética. La teoría del

todo intenta introducir la gravedad en el paquete. En otras palabras, una teoría del todo, si llega a desarrollarse, debe explicar el electromagnetismo, las fuerzas nucleares débil y fuerte y la gravedad bajo una sola rúbrica matemática.

Existen muchos obstáculos que es necesario salvar para que tal teoría alguna vez emerja. Sin embargo, en los siguientes capítulos discutiremos que más que modelos matemáticos o tecnología, lo que parece obstruir más el camino es el dogmatismo o los intereses políticos de los científicos, su incapacidad o falta de voluntad para pensar creativamente y fuera de la academia o de artículos de fe institucionales. Este dogmatismo es de lo más obvio cuando encontramos científicos que han sido estigmatizados por sus ideas. David Bohm, cuyas ideas tocaremos en el último capítulo, es sólo uno de estos científicos. Teilhard de Chardin, cuyas ideas dominarán la segunda mitad de este libro, es no solamente otro ejemplo, sino el arquetipo de los científicos rechazados. Regresaremos con Teilhard de Chardin y con David Bohm porque en el meollo de las variables escondidas de éste, así como en su exploración sobre la naturaleza de la conciencia existe una gran coincidencia con Teilhard de Chardin. Sin embargo primero aislaremos lo que ha surgido de las dos teorías principales que contienden por el éxito.

Los científicos creen en la simetría y la simplicidad. Para muchos, el famoso comentario de Paul Dirac de que “es más importante que exista belleza en las ecuaciones a que éstas encajen en los experimentos”, se ha vuelto un precepto.² Los números mediante los cuales entienden el mundo que tienen que representar, no son los de los elementos caóticos e inestables en la naturaleza,

sino los estables. En otras palabras, sus fórmulas cuantifican fenómenos que permanecen estables a través de las transformaciones.

Para entender lo que es esto y lo que la simetría significa, vamos a imaginar que el mundo conocido que los científicos estudian es un texto. Supongamos que Dante está en lo correcto y que su cosmología también es la correcta. Imaginemos que los científicos intentan entender el más profundo funcionamiento de ese texto. La primera cosa que deben hacer es capturar cada línea del poema en su supercomputadora y tabular los diferentes patrones que aparecen. Rápidamente, tan pronto como el texto completo –Infierno, Purgatorio y Paraíso– haya sido capturado, se darán cuenta de que los cien cantos están constituidos por permutaciones de 25 letras. El descubrimiento de estas letras puede no ser muy distinto al que nos llevó al modelo estándar de la física cuántica. Los científicos encontrarían una leve simetría, algo que permanece constante pese a las permutaciones. Sin embargo, el descubrimiento apenas explica la profundidad del texto que han capturado en su computadora. Por lo tanto, su siguiente tarea será encontrar si estas 25 letras están arregladas en alguna especie de patrón. La computadora, desde luego, deberá ser presta en realizar este trabajo que a los lingüistas les ha tomado siglos, y encontrará morfemas y fonemas, prefijos y sufijos. Posiblemente no se entienda la manera en que las letras han llegado a ser semánticas, pero los patrones deben surgir y nuestros imaginarios científicos habrán descubierto las palabras. De nueva cuenta, pese a los diferentes terrenos de la cosmología del texto de Dante –los ríos congelados del infierno o los inclinados riscos del

purgatorio— la única constante de tal mundo es que está hecho de unidades significativas. Y así como el contraste meteorológico de una región de ese universo con la siguiente puede ser asimétrico, el hecho de que cada región está constituido de palabras, apunta a una simetría. Aunque nuestros científicos celebran el descubrimiento, saben que falta trabajo por hacer si han de entender como es que ese mundo realmente funciona. Las palabras son un gran descubrimiento, pero ¿siguen estas palabras un patrón? Los discos de la supercomputadora podrían tropezar un poco más aquí, pero eventualmente obtendrían un logro: ciertos tipos de palabras parecen tener alguna función y toman cierto lugar en el poema. Los científicos habrán descubierto lo que ciertos lingüistas han logrado en la última parte del siglo XX: una sintaxis y una gramática generativa. Tarde o temprano la computadora también descubrirá el esquema de la métrica y la rima del poema, así como su diseño en conjunto. Una vez que los científicos se hayan dado cuenta que todas estas cosas son simétricas —es decir, que ocurren en iguales partes o medidas, para recurrir al significado original de la palabra— tendrán un entendimiento más profundo del mundo de Dante. Sin embargo, después de todas sus investigaciones, permanecerán elementos caóticos, asimétricos, elementos que no tienen patrón o recurrencia.

Tal como nuestros imaginarios científicos analizaron a Dante, los científicos reales buscan encontrar patrones en los diferentes fenómenos de la naturaleza. Durante el siglo XX, la fe de los científicos en la simetría sólo se consolidó cuando se dieron cuenta que cada ley o fuerza que habían descubierto era aplicable en cualquier lugar del universo. Como el texto de Dante, gobernado por

las leyes del lenguaje y organizado por la métrica y la rima, las partículas tienen las mismas características en cualquier parte y están sujetas a las mismas leyes. Este tipo de simetría que sostiene que las leyes de la naturaleza son las mismas en todas partes del universo, es conocida como “invariancia transicional” y corresponde a la ley de conservación del momento lineal.

En el esquema de las cosas según los científicos y central a su fe en la simetría y su rompimiento, se encuentran las cuatro fuerzas de la naturaleza. Las dos con más amplio rango y más obvios efectos en la escala del mundo, son la gravedad y el electromagnetismo. Las otras dos fuerzas, las nucleares débil y fuerte, actúan sólo en el rango del núcleo atómico. Cada una de las fuerzas parece estar en una sintonía más que sutil, de manera que si alguno de los valores fuera ligeramente mayor o menor, el universo como lo conocemos no existiría. Pese al hecho de ser la más obvia para nosotros, la gravedad es la fuerza más débil, pero fue la primera en ser entendida de una manera sistemática. Hemos tratado esto en el capítulo en el que hablamos de Newton y Einstein. Si sentimos la gravedad más que cualquiera de las otras fuerzas, es porque es aditiva, es decir, que cada átomo que apilamos en una masa contribuye al efecto total.

El electromagnetismo es con mucho una fuerza más fuerte. Sin embargo, ni la electricidad ni el magnetismo se suman de la manera que la gravedad lo hace. La electricidad se manifiesta a través de sus cargas, positiva y negativa; el magnetismo a través de sus polos, también positivo y negativo (o norte y sur), y puesto que ambos – polos y cargas– tienden a cancelarse mutuamente, en muchas

condiciones se anula o se reduce la influencia global del electromagnetismo. En el electromagnetismo vemos una versión a pequeña escala de los intentos para llegar a una teoría del todo. Hasta el siglo XIX, la electricidad y el magnetismo se veían como dos fuerzas diferentes y sus influencias se entendían mediante dos fórmulas separadas. Brevemente, los científicos entendían la electricidad y el magnetismo como entienden ahora las cuatro fuerzas: sin una única propuesta matemática que abarcara su acción. James Clerk Maxwell descubrió un grupo de ecuaciones que describían tanto la electricidad como el magnetismo en un solo paquete. Este impulso sintético es exactamente el mismo que ahora guía a los físicos a intentar encontrar una teoría del todo. Lo anterior fue el primer intento exitoso de unificación y todavía inspira a los científicos para ir más allá con la unificación de las fuerzas de la naturaleza, con la meta de encontrar un solo grupo de ecuaciones que describan todas las fuerzas como facetas de una sola superfuerza. El electromagnetismo, a diferencia de la gravedad, domina en las regiones de pequeña escala, en la formación de los átomos y las moléculas; es tal su dominio, que los electrones y el núcleo del átomo están unidos por el electromagnetismo, que es también la ligadura, por así decirlo, que mantiene unidas las moléculas. Si un alpinista tiene que luchar por subir por una cuerda en contra de la obvia fuerza de gravedad, lo que lo previene de una caída es la fuerza electromagnética, que es más fuerte aunque no tan obvia. Si la sogas se rompiera por el peso del escalador, se debería a que el jalón gravitacional de la tierra entera, que contiene

5.97×10^{24} kg. de materia habría tenido éxito en romper la ligadura electromagnética de unas cuantas moléculas de la soga.

La potencia del electromagnetismo es tal, que sin control sería capaz de desintegrar el núcleo del átomo. Lo que previene esto es una fuerza aun mayor: la fuerza nuclear fuerte, que a la escala del núcleo sobrepasa la repulsión eléctrica en 100 veces. Sólo recientemente la fuerza nuclear fuerte ha sido entendida como la manifestación de una “fuerza de color o de pegamento”, más profunda, que opera entre los quarks y entre los gluones dentro de los protones y neutrones que forman el núcleo.

Cada una de las fuerzas se manifiesta por medio de un intercambio de mensajes entre partículas. Y si la fuerza nuclear débil no es parecida a las otras tres fuerzas en otros aspectos, sí lo es en este. El rango de la fuerza es limitado y la interacción toma lugar mediante partículas mensajeras llamadas “vectores bosones intermediarios”. Como la consolidación de la electricidad y el magnetismo un siglo antes, a fines del siglo XX Aldous Salam y Steve Weinberg, trabajando independientemente, encontraron la manera de consolidar la interacción débil y la interacción electromagnética bajo una sola propuesta matemático.³

Sin embargo, el encontrar una superfórmula, por llamarla de alguna manera, de un grupo de ecuaciones que revele como interactúa cada fuerza de modo que los más profundos mecanismos de nuestro mundo puedan ser entendidos, sigue siendo una meta inalcanzable. Las dos teorías que parecen los más posibles candidatos para la consecución de la meta son la teoría de las supercuerdas y la supersimetría. Más adelante seremos breves al

tratar ambos temas debido a su complejidad, pero puesto que ambas teorías son verdaderamente unos bellos modelos matemáticos, trataremos de ver como se sostienen ante el mundo de los hechos. Después de todo, pese a la aseveración de Dirac de que es primero la belleza de las ecuaciones a que se adapten a los experimentos, debemos recordar que hay concepciones bellas que son verdaderas. Mientras tanto, hacia el final del capítulo y como una guía que nos ilumine a través de la segunda parte del libro, nos gustaría alinearnos con Bertrand Russell, quien sostiene que los científicos, filtrando las partes de la naturaleza que no son accesibles al razonamiento matemático, brindan al universo un tinte de racional belleza que corresponde más a las matemáticas que a las características centrales del universo.⁴

La teoría de la supersimetría surgió del éxito que la *simetría gauge* tuvo en la manera de entender las fuerzas y las partículas.⁵ En los años setenta, la mayor asimetría era la distinción entre partícula y fuerza, o fermiones y bosones, respectivamente. La asimetría como se concebía entonces, no era necesariamente aparente, sino que era el reflejo del espín de cada entidad. La supersimetría resolvió el problema añadiendo otras cuatro dimensiones a las cuatro dimensiones del espacio-tiempo. Estas dimensiones no son las mismas que aquellas que encontramos al mirar la teoría de las supercuerdas. Sin embargo, para ser imparciales, tenemos que admitir que los preceptos de la supersimetría permitieron trabajar la teoría de las supercuerdas.⁶

La supersimetría, a diferencia de otras muchas teorías, no emergió de la necesidad de resolver un problema. Originalmente

reconocida como una propiedad de ciertos modelos, en un momento dado los científicos se dieron cuenta de que la teoría podía resolver un cierto número de “misterios” de la física de partículas, así como proveer nuevos acercamientos para resolver otros rompecabezas. ¿Qué misterios resuelve la supersimetría? Básicamente el modelo estándar tiene un serio problema conceptual llamado el problema de la jerarquía.⁷ La escala natural de la teoría primaria es la escala de Planck (10^{-35} m). El modelo estándar es la descripción de los *quarks* y los leptones y de sus interacciones hasta la escala de 10^{-17} m. El problema es que la teoría cuántica, la física a una escala, debe contribuir, o ser coherente con la física a otras escalas, así que no es consistente tener estas escalas tan separadas. En vez de lo anterior, la escala cuántica y la de Planck deberían estar muy cerca una de otra. El problema realmente tiene dos partes. Primero, dado que hay una separación de la escala del modelo estándar respecto a la escala de Planck, ¿porqué el modelo estándar termina precisamente en esa y no en otra escala? El asunto sondea lo más profundo del modelo estándar: ¿es una escala aleatoria, un modelo impuesto por el hombre o sólo un modelo elegante? La última cuestión nos lleva a un segundo problema: ¿qué puede hacer que la teoría mantenga la separación de una manera consistente? El modelo supersimétrico resuelve la segunda parte del problema y nos da una idea de como resolver la primera parte. Esto lo hace utilizando primordialmente la unificación de bosones y fermiones. La verdadera naturaleza de fermiones y bosones implica que deben llegar a juntarse en la escala a la que se cancelen, por lo que la mezcla de escalas puede ser cancelada de una manera general.

La supersimetría nos da una contribución más importante para resolver los serios misterios que la ciencia ha encontrado en su búsqueda de una teoría del todo. Como hemos visto, por siglos los físicos activamente han tratado de unificar nuestra descripción de las fuerzas de la naturaleza. Digámoslo otra vez, el tener cuatro fuerzas diferentes en lugar de una sola fuerza básica, sugiere que la física todavía no tiene bien fundado un principio de unificación. Con la teoría cuántica, uno puede calcular como se comportaría una fuerza si se estudiara en muy pequeñas distancias. Notablemente, cuando esto se hace a escalas cada vez más pequeñas con las fuerzas nucleares débil y fuerte y con el electromagnetismo, nos damos cuenta de que estas fuerzas tienden a ser similares. Más notablemente, cuando el estudio se repite con las fórmulas del modelo de la supersimetría –como se hizo en los años ochentas– las fuerzas llegan a ser esencialmente iguales a distancias realmente muy pequeñas, aunque en el modelo estándar nada sugiera que esto debería pasar.

Como anotamos anteriormente, la supersimetría no sólo precede a la teoría de las supercuerdas, sino que presenta la condición necesaria para que ésta funcione. La de las supercuerdas, sin embargo, es una teoría mucho más efectiva en su intento de unificar las cuatro fuerzas. Como muchas de las teorías que intentan ser exitosas, la de las supercuerdas es una teoría elegante, pero además muy apegada al sentido común. Resuelve la división entre las fuerzas y las discrepancias de la física atómica, postulando que las entidades atómicas y subatómicas y sus interacciones no son puntos o “partículas”, ni puntos matemáticos, sino cuerdas, y la

materia y las fuerzas como las conocemos son solamente las manifestaciones de los diferentes modos de vibración de dichas cuerdas. El postular estas cuerdas, resuelve muchas discrepancias menores.

No obstante, su mayor contribución hasta el momento, es que a medida que los físicos ven el modelo estándar a través de la perspectiva de las supercuerdas, son más capaces de darse cuenta como todas las fuerzas son iguales cerca de la escala de Planck.

En un capítulo posterior exploraremos la teoría de las supercuerdas un poco más a fondo. Y aunque nosotros preferimos los postulados de las supercuerdas a los de la supersimetría, la razón por la cual pensamos que ambas parecen seguir el camino correcto, que ambas se están haciendo las preguntas correctas, es porque las dos se centran en aspectos importantes. Primero, confirman lo que muchos científicos parecieran negar: a saber, los límites de nuestras actuales herramientas científicas, así como la manera en la que debe ser revisado el enfoque actual del asunto. Tanto la supersimetría como las supercuerdas resuelven discrepancias de la física hasta el punto de unificar las cuatro fuerzas, sólo hasta, o por debajo de la escala de Planck. Su solución, dicho de otra manera, no puede ser confirmada usando los actuales métodos y tecnologías, puesto que ningún supercolisionador puede lograr la energía necesaria para romper el átomo a la escala de Planck.⁸ Subrayando las deficiencias de la física experimental, las supercuerdas también nos proveen de un universo donde los límites son importantes, un universo donde existen límites al tiempo y al espacio, un universo donde pasado el límite contemplaríamos, no

necesariamente una diferente realidad, sino donde el mundo fracturado que la física nos describe, no lo estaría más.

La pregunta que surge, si los postulados de la teoría de las supercuerdas, socavan el decir y los métodos de la física de partículas, es: ¿significa que no hay manera de confirmar la teoría y de probar que en lo profundo la naturaleza está unificada por un elegante y legible grupo de leyes? ¿Establece, en otros términos, que la física llegó a su final? Para muchos la respuesta es sí. Para nosotros, sin embargo, es un definitivo no. Para nosotros la teoría de las supercuerdas es sólo un prisma que concentra la difusa luz de cuatro diferentes fuerzas, las unifica y luego las difracta, de manera que esto puede ser explicado a través de otras ciencias, otras teorías. En la segunda parte del libro, veremos las posibles opciones.

¹ Gerard Holton y Yehuda Elkana (eds.), *Albert Einstein, Historical and Cultural Perspectives*, Princeton, NJ., Princeton University Press, 1982.

² Paul Dirac, "The Evolution of the Physicist's Picture of Nature", *Scientific American*, mayo de 1963, p. 47.

³ El descubrimiento de Salam y Weinberg, así como el de Sheldon Glashow que extendió y generalizó la reformulación de su trabajo, está, junto con la función y rol de las cuatro fuerzas, extensamente explicado en el libro de Frank Close *The Cosmic Onion* (Heinemann, Londres, 1983) y en el de Coughlan and Dodd *The Ideas of Particle Physics* (Cambridge University Press, Cambridge, 1991).

⁴ La cita de Dirac ha inspirado gran cantidad de debates. El libro de Judith Wechsler *Aesthetics in Science* (Cambridge, MIT Press, 1978) ofrece muchas e interesantes perspectivas.

⁵ La *simetría gauge* es un concepto usado en la teoría de los campos, que describe un campo que no cambia cuando se aplica alguna operación a todas las partículas en cualquier punto del espacio. El término *gauge* simplemente significa "medida", y se refiere al punto en el que los campos con simetría gauge pueden ser remedidos desde diferentes líneas base, sin afectar sus propiedades.

⁶ Tenemos otra versión sobre el surgimiento de la teoría de las supercuerdas, pues en su libro de 1965, *La connaissance de l'univers*, el astrofísico Jean Charon hablaba, refiriéndose a lo elemental, de un medio continuo que puede poseer ciertos estados vibratorios. Una cuerda vibratoria que posee una oscilación fundamental que pudiéramos calificar de "natural". Rastreado el origen de este supuesto llegamos a Teilhard de Chardin a través del físico Louis de Broglie, quién fuera miembro del comité científico que aprobó la publicación en 1955 de *El fenómeno humano*. Pero no poseemos la suficiente documentación probatoria para dar esto como un hecho.

⁷ Este problema de la jerarquía se puede plantear mas simplemente de la siguiente manera: porqué las diferentes fuerzas operan a tan diferentes energías, cuando realmente son todas manifestaciones de un mismo fenómeno subyacente, y como pueden ser unificadas matemáticamente, si esto es posible. Pero el definirlo así nos limitaría el argumento.

⁸ De acuerdo a la ecuación de transformación de Lorentz $m = m_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$, para acelerar cualquier cantidad de masa a velocidades cercanas a la de la luz se requiere una energía que tiende a infinito.