

Por qué de las dimensiones "Extras"?

Why dimensions "Extras"?

Alexander Moreno Sánchez

Centro Colombiano de Cosmología y Astrofísica

Recibido xx de xxx. xxx; Aceptado xxx de xxx. xxx; Publicado en línea xx de xxx. xxxx

Resumen

En este corto trabajo se hace una revisión de las ideas que justifican la incorporación de dimensiones adicionales en los modelos teóricos de la física. Mostramos, algunas tópicos históricos alrededor de la física de altas dimensiones. Se mencionan algunas consecuencias y se aportan algunos puntos de vista propios.

PACS: 98.80.-k, 98.80.Es

Palabras Claves: Dimensiones, modelos Kaluza-Klein, modelos braneworld

Abstract

In this short paper is a review of the ideas that justify the inclusion of additional dimensions in the theoretical models of physics. We show some historical topics about the physics of higher dimensions. Are some consequences and some bring their own views.

PACS: 98.80.-k, 98.80.Es

Keywords: Dimentions, Kaluza-Klein models, braneworld models

©2011. Centro Colombiano de Cosmología y Astrofísica. Todos los derechos reservados.

1 Introducción

La historia de la ciencia es bastante entreverada, en ocasiones parece simple, trivial, clara, terminada, pero en otras se torna compleja, oscura, incompleta y altamente especulativa, trato de entender esto pensando que es el camino que debe seguir la ciencia para lograr una mayor comprensión, un mejor acercamiento a eso tan difícil hoy día de definir como es la realidad, ¿qué es la realidad?, se preguntan muchos, y en muchos lugares y tiempos esta creo ha sido una de las preguntas más tormentosas de tratar, sabemos hoy día como lo he leído y escuchado en muchas partes que la realidad es invisible, está oculta, y que el camino que conduce a ella es muy difícil de transitar. Aquellos, que han dedicado una parte de su vida o toda su vida a tratar de hacer una imagen completa de la realidad, solo, me parece, han conseguido escasos fragmentos y cuando han tratado de componer el rompecabezas, han notado que cada vez hacen falta más piezas, y no solo eso, sino que las porciones

que creemos están definidas comienzan a desdibujarse lentamente.

Una de esas porciones de realidad que hemos tratado de atrapar es el de las dimensiones espaciotemporales del universo, pero muchos se preguntaran que son esas dimensiones, talvéz, en las concepciones místicas o religiosas es donde tenemos un encuentro con estas ideas, posteriormente en algunas filosofías nos encontramos con este tipo de conceptos o de intuiciones, pero es en el campo de la ciencia donde se han hecho algunos avances, de forma sistemática, para intentar despejar ese misterio o esa noción un poco oscura de las ciencias físicas. Hoy día en el marco de complejas teorías físicas nos encontramos con la concepción profunda de dimensiones adicionales, casi que damos por aceptadas tales ideas, las asumimos como ciertas en muchos modelos teóricos, pensamos en ellas bajo criterios estrictamente matemáticos, llegamos a conclusiones y predicciones basadas en ellas, bueno en fin, nos preguntamos, si tienen un fundamento, si las conoceremos, cuales son efectivamente

sus consecuencias, como podemos realmente entrar en contacto con ellas. Este corto trabajo trata de presentar algún pequeño e incompleto acercamiento a esa moderna idea de las dimensiones adicionales. Para empezar se considera una corta revisión de la incorporación de las dimensiones adicionales en el contexto de las teorías físicas[1][2][3][4].

2 El por qué de las dimensiones “Extra”

Es bien sabido que desde que apareció la Teoría Especial de la Relatividad, nos enfrenta directamente con las dimensiones del espaciotiempo, nos movemos en un mundo de cuatro dimensiones, a saber, las tres dimensiones espaciales (ancho, largo y alto, o bien x, y, z) y el tiempo considerado como una dimensión, unidades ellas forman lo que algunos denominan el continuo espaciotiempo, sí, espacio y tiempo en pie de igualdad. Pero, ¿cuál es el verdadero rostro de esta dimensión?... ¿por qué ahora y no antes –de Einstein, se entiende- el tiempo es considerado como una magnitud insustituible en el campo físico?... Con anterioridad podía separarse nítidamente, por un lado el espacio (las tres coordenadas x, y, z), y por otro el tiempo denotada por t .

Para un tiempo t determinado, el espacio (x, y, z) está, también totalmente determinado para cualquier suceso o acontecimiento del mundo físico. De igual forma, en una “localización” prefijada (x, y, z) , un suceso o acontecimiento se produce en el instante t de forma totalmente determinista. Y esto ocurría para cualquier observador, por supuesto, fuese cual fuese su estado de movimiento[5][6].

Ahora bien, tal obiedad fue sustancialmente cambiada al advenimiento de las llamadas “Transformaciones de Lorentz”, que daban explicación o resolvían la aparente paradoja que surgía de la “experiencia de Michelson-Morley”, y se deducían u obtenían al traducir algebraicamente los dos principios de la Relatividad Restringida:

1. La luz se propaga con la misma velocidad c en todos los sistemas galileanos;
2. Los sistemas galileanos son equivalentes en el sentido de que existe una perfecta reciprocidad entre sus observaciones físicas.

En tales ecuaciones las relaciones entre las (x, t) y las (x', t') obtenidas por los observadores que se mueven uno con respecto a otro a la velocidad v para acontecimientos que se producen a lo largo del eje de las x , son

$$x' = \frac{(x - vt)}{(1 - v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}}, \tag{1}$$

$$t' = \frac{(t - vx/c^2)}{(1 - v^2/c^2)^{\frac{1}{2}}}. \tag{2}$$

Ahora calculemos la expresión, $c^2t^2 - x^2$ De las expresiones anteriores, tendremos

$$c^2t'^2 - x'^2 = c^2 \frac{(t - vx/c^2)^2}{(1 - v^2/c^2)} - \frac{(x - vt)^2}{(1 - v^2/c^2)}, \tag{3}$$

realizando operaciones llegamos a

$$c^2t'^2 - x'^2 = c^2t^2 - x^2. \tag{4}$$

Vemos pues, que la expresión $s = c^2t^2 - x^2$ es un invariante que se llama “intervalo de universo”, “línea de mundo” o “intervalo espaciotemporal”. Espacio y tiempo, según lo anterior, son variables, pero la cantidad obtenida, compuesta por espacio y tiempo sí se conserva, lo que nos lleva a la posibilidad de contabilizar los sucesos o acontecimientos de nuestro universo físico relativista sobre esta magnitud invariante, “intervalo de universo”, que es la única que está ahora bien “determinada” para cualquier observador. Ni el espacio ni el tiempo en este mundo relativista están ya determinados, pues aparecen “entrelazados” entre sí por las llamadas transformaciones de Lorentz, según el movimiento relativo de cada observador.

Ahora bien, tomando el espacio galileano con dos dimensiones (x, y) , un acontecimiento acaecido en el punto P queda definido, para un observador Σ , por las coordenadas (x, y) y el instante t , para un observador situado en O . Entonces, para otro observador Σ' que se desplace con velocidad v respecto al observador Σ , situado también en O , el acontecimiento de P se producirá en las coordenadas (x', y') y el tiempo t' definidos por las relaciones anteriores, es decir, diferentes a los anteriores, así que la relatividad de los movimientos de los observadores Σ y Σ' da al traste con la evidente “utilidad” que se obtenía con los sistemas de coordenadas galileanos en un mundo no relativista.

Todo nos conduce a buscar un “sistema de representación” de coordenadas que se “aproveche” de la anteriormente encontrada invariancia, es decir, del “intervalo de universo”. Esa es la base para la introducción de una dimensión “imaginaria”, en una representación muy útil para la conservación del citado “intervalo de universo”.

Si sustituimos el eje y por el eje imaginario ict con $i = (-1)^{1/2}$, tendremos la “representación de Minkowski”. En esta representación se suele tomar la velocidad de la luz igual a la unidad.

Por ejemplo, la distancia OP que es igual a $x^2 + y^2$, aquí será $x^2 + i^2c^2t^2 = x^2 - c^2t^2$, y la distancia de P a O entonces $c^2t^2 - x^2$, que es precisamente el “intervalo de universo”, distancia que es invariante sea cual sea el estado de movimiento del observador ($\Sigma, \Sigma', etc.$) situado en O . Por lo tanto, las ecuaciones de Lorentz relativistas que nos señalan la variabilidad del espacio y el tiempo, nos indican la “con-

veniencia” práctica de introducir la unidad imaginaria temporal en un sistema de coordenadas llamado de Minkowski, muy útil para la descripción de los sucesos o acontecimientos de nuestro universo espacio-temporal[7].

Y continuando con nuestro desarrollo de las dimensiones “extras”, advertimos que la introducción del tiempo como cuarta dimensión en relatividad, no quiere decir que esta dimensión sea imaginaria, como podría suponerse cuando hablamos inicialmente de la representación de Minkowski, sino que su evidente realidad viene dada por las ecuaciones de Lorentz que son un resultado de la naturaleza, obtenido de la constancia de la luz para todos los observadores sea cual sea su estado de movimiento. Podríamos decir que la i imaginaria se introduce en la dimensión tiempo para transformar esta dimensión temporal en una espacial, y construir así “la distancia” llamada intervalo de universo. Este último invariante es lo que indirectamente nos indica la conveniencia de transformar, a través de la unidad imaginaria i , la dimensión tiempo en una dimensión espacial, iniciando así una progresión que continuará con la Relatividad General a una geometrización de la Física, de todo el espacio-tiempo que incluirá también dentro de sí toda la materia-energía.

Este tratamiento llevó a Kaluza en 1919 y posteriormente, en 1926 a Klein, a generalizar la teoría de la Relatividad, edificada sobre las cuatro dimensiones anteriores, usando un modelo geométrico en un espacio-tiempo de cinco dimensiones, es decir, introduciendo una dimensión más, lo que les permitió unificar gravitación y campo electromagnético. Claro esta, que esta generalización presenta varias dificultades fundamentales.

Con estas cinco dimensiones Kaluza demostró que el “campo gravitatorio” de este universo pentadimensional se comporta exactamente como la gravedad conocida más el campo electromagnético de Maxwell, contemplado desde la perspectiva de las cuatro dimensiones. Según esto, no habría fuerzas en absoluto, sólo existe la cerrada geometría pentadimensional con partículas serpenteando a través de una estructurada “nada”.

Pero en los trabajos de Kaluza-Klein se considera a la quinta coordenada “compacta”, es decir, que está enrollada en un círculo muy pequeño con un radio del tamaño de la escala de Planck $10^{-33} cm$. La mínima distancia presumible del universo. Sería la dimensión tan pequeña que no podría verse, o detectarse de forma sencilla, pero sus efectos sí podrían ser cunatificados.

En el espacio-tiempo de cinco dimensiones de Kaluza-Klein, el tensor métrico de dicho espacio-tiempo contiene la métrica cuatridimensional g_{ij} y el potencial vector A_i del campo electromagnético, además de las funciones escalares σ, φ

$$g_{ij} = g_{ab} + \kappa^2 \varphi^2 A_a A_b \kappa \varphi^2 A_a, \quad (5)$$

$$[\hat{g}_{AB}] = |\kappa \varphi^2 A_b \varphi^2|, \quad (6)$$

donde A y B representan índices tensoriales que van de 0 a 4, y las minúsculas a, b, \dots índices tensoriales de 0 a 3. Así, las cinco coordenadas de un espacio-tiempo de Kaluza serían

$$(x, A) = (x^a, x^4) = (x^0, x^1, x^2, x^3, x^4), \quad (7)$$

donde la coordenada 0-ésima es la coordenada temporal, la coordenada 4-ésima es la coordenada asociada a la quinta dimensión adicional, y las otras tres son las coordenadas espaciales ordinarias.

Como hemos dicho, Kaluza añade la llamada “condición cilíndrica” (compactación), que consiste en imponer que ninguna de las componentes del tensor pentadimensional \hat{g}_{AB} dependa de la coordenada adicional x^4 . Entonces las ecuaciones de campo serían las condiciones del Electromagnetismo clásico más las ecuaciones de la Relatividad General y una ecuación más para el campo escalar adicional.

$$R_{ab} - \frac{1}{2} R g_{ab} = \frac{1}{2} \kappa^2 \varphi^2 T_{ab}^{EM} - \frac{1}{\varphi} [\nabla_a (\partial_b \varphi) - g_{ab}], \quad (8)$$

$$\tilde{R}_{AB} - \frac{1}{2} \tilde{R} \hat{g}_{AB} = 0 \Rightarrow \nabla_a F_{ab} = \frac{-3 \partial_a \varphi}{\varphi F_{ab}}. \quad (9)$$

Dichas ecuaciones de los campos gravitatorio o eléctrico se generalizan con facilidad a otras dimensiones[7].

Entonces si pensamos en un espacio de n dimensiones debemos tratar con una ley inversa de las potencias $n - 1$. Por ello, en tres dimensiones, $n - 1 = 2$ será la ley inversa del cuadrado, en cuatro dimensiones $n - 1 = 3$ será la ley inversa del cubo, y así para las demás dimensiones. Pero, en un espacio de más de tres dimensiones, por ejemplo, se demuestra que los satélites de un planeta trazarían una rápida espiral hacia él, siendo absorbidos, y lo mismo ocurriría con los átomos, así que la química, y la misma vida no serían posibles. También la propagación de las ondas depende sensiblemente de las dimensiones adicionales, en un espacio con un número par de dimensiones, existirían efectos de reverberación, con lo que la onda no se propagaría con nitidez, como ejemplo, la dificultad de transmitir señales bien definidas en una superficie de dos dimensiones como una lámina de caucho. En este punto podríamos pensar que los modelos de altas dimensiones estarían fracasados, ya que en esta primera aproximación no darían cuenta de fenómenos normales y convencionales, y por lo tanto no tendría sentido

continuar con modelos de dimensiones adicionales, es allí, donde se hace muy fuerte la idea de la compactificación de dimensiones adicionales, ya que si compactificamos las dimensiones adicionales, estaríamos como ‘ocultándolas’, es decir, que las dimensiones adicionales las involucramos para obtener explicaciones no convencionales de fenómenos naturales, pero en el momento en el que nos topamos con obstáculos en las explicaciones corrientes o convencionales, las compactificamos[8].

De forma más precisa, la compactación de la quinta dimensión significa que lo que se toma como un punto en el espacio tridimensional es en realidad un pequeño círculo entorno a otra dimensión del espacio. Desde cada punto del espacio parte un pequeñísimo bucle en una dirección que no es ni arriba, ni abajo, ni ninguna otra en el espacio “percibido” por nuestros sentidos, esto es la idea geométrica tras la compactificación.

Según lo anterior, la teoría de Kaluza-Klein se enfrentó a dificultades enormes que la llevaron a quedar apartada de la ciencia, ya posteriormente, con el descubrimiento de las fuerzas débil y fuerte, hasta finales de los años setenta, ya con las GTU o Teorías Unificadas y la Supergravedad, se hizo aun mayor su alejamiento de las teorías convencionales y útiles[9].

La propiedad central de los campos de fuerza es la presencia de algunas simetrías abstractas, lo que le confiere poder, elegancia y amplitud conceptual. Esta presencia de simetrías sugiere algún tipo de geometría oculta. Precisamente en la teoría de Kaluza-Klein revitalizada, las simetrías del campo de gauge se vuelven concretas: son las simetrías geométricas que viven asociadas a las nuevas dimensiones espaciales.

Como en la idea central de Kaluza-Klein las fuerzas se acomodan introduciendo más dimensiones espaciales en el espacio-tiempo; y como hay varias fuerzas para acomodar, ello requiere la introducción de varias dimensiones adicionales. El recuento del número de operaciones de simetría necesario para esa gran fuerza unificada requiere siete nuevas dimensiones: en total diez dimensiones, once con el tiempo. Por tanto, la versión moderna de la teoría de Kaluza-Klein postula un universo de once dimensiones[10].

Y de nuevo se supone que las siete dimensiones adicionales están “enrolladas o compactificadas” de modo que por su tamaño no se pueden percibir. La forma de enrollar una dimensión adicional es en un círculo, pero hay muchas formas de “enrollar” espacios de más dimensiones. Por ejemplo, con siete dimensiones el número de tipologías posibles es muy grande.

El análogo heptadimensional de una esfera es una heptaesfera. Cada punto del espacio tridimensional es una diminuta “hiperesfera” de siete dimensiones. La heptaesfera posee simetrías adicionales no encontradas en la esfera cor-

riente. Con éstas se identifican las “simetrías de gauge” que subyacen en los campos de fuerza.

Sabemos que el modelo estándar (ME) de partículas unifica la fuerzas electromagnética, débil y fuerte, pero no las interacciones gravitacionales. La teoría de cuerdas es una candidata para unificar los efectos gravitacionales con las interacciones del ME de forma consistente a nivel cuántico. En esta teoría, los elementos básicos de la materia (leptones y quarks) dejan de ser definidos como partículas puntuales, pasando a ser descritos como objetos unidimensionales llamados cuerdas. En esta descripción, cada modo de vibración representa una partícula distinta.

Las distintas versiones de las teorías de cuerdas y supercuerdas son de hecho teorías de Kaluza-Klein en las que se han combinado principios de cuantización. Existen versiones de teoría de cuerdas de 10, 11 y 26 dimensiones. En la teoría de supercuerdas, además de la dimensión temporal y las tres dimensiones espaciales ordinarias, se conjetura que las direcciones adicionales podrían tener una topología de variedad de Calabi-Yau de seis dimensiones. (La variedad de Calabi-Yau es una variedad compacta que admite una métrica con curvatura de Ricci nula, es decir, es una variedad “plana”. En una variedad compleja, los únicos ejemplos son familias de toros –donuts-).

Las primeras teorías de cuerdas no contenían grados de libertad fermiónicos, por eso recibieron el nombre de cuerda bosónica, pero en 1984 Michael Green y John Schwarz, junto con otros autores, se dieron cuenta de que cuando se incorpora la supersimetría a la teoría de cuerdas, la Mecánica Cuántica no tiene problemas con los infinitos. A esta teoría se le denominó de supercuerdas y requirió un espacio-tiempo de 10 dimensiones, en la cual para su formulación, 6 de las 10 dimensiones, como dijimos, están compactificadas de acuerdo con la hipótesis de Kaluza-Klein.

Pero, a finales de 1990 Joe Polchinski mostró que las teorías de cuerdas contienen, además, objetos extendidos: las DP-branas (siendo p las dimensiones espaciales, y D en honor a Dirichlet). Una 0-brana sería una partícula puntual que evoluciona según una “línea de mundo” (la extensión natural del “intervalo de universo”, visto con anterioridad); una 1-brana es la citada cuerda que evoluciona según la llamada “hoja de mundo” y una 2-brana es una membrana cuya evolución se llama “volumen de mundo”.

Peter Hovara y Edgard Witten consideraron teorías de cuerdas con dos 10-branas encajadas en un espacio-tiempo de 11 dimensiones. A bajas energías la gravedad se propaga en todo el espacio-tiempo multidimensional, mientras el resto de los campos se localiza en las branas. En particular, la localización de la materia a lo largo de la brana explica por qué la Física a bajas energías es efectivamente cuatro dimensional para todas las interacciones excepto la gravedad.

Existen diversos mecanismos para localizar los campos del ME (modelo estándar) en la brana; el más simple es considerar la gravedad de la brana, y también simetrías especiales en las dimensiones extra a las que se llama Orbifold, así como defectos topológicos (vórtices y tipo pared).

En el modelo RS se parte del uso de la tensión de la brana para producir gravedad, en presencia de una constante cosmológica. Las soluciones de las ecuaciones de Einstein, entonces, incorporan además condiciones de frontera apropiadas a la presencia de una o dos branas conocidas como condiciones de Israel. Es notable que puedan encontrarse unas soluciones que preservan la invariancia de Poincaré cuatro-dimensional. En este tipo de modelos las dimensiones extras no tienen límite de tamaño.

Los escenarios de dimensiones extras tienen implicaciones fenomenológicas en nuestro mundo cuatrodimensional, tales como desviaciones de la ley gravitacional de Newton para cuerpos masivos en la brana, el efecto Casimir o el corrimiento Lamb, energía y materia oscura en términos geométricos, entre otras muchas implicaciones.

Como anotación final haré hincapié en la importancia de la introducción de la unidad imaginaria i , en los cálculos realizados con las unidades extras, en particular en la cuarta dimensión (tiempo), como oportunamente vimos, para “asejarla” a un espacio en la expresión del “intervalo de universo”, y también, y ya como número complejo (a, ib) insustituiblemente en el mundo cuántico, pues, por ejemplo, en los estados posibles abiertos al electrón, que se escriben como $w|A\rangle + z|B\rangle$, los factores de peso w y z son números complejos, de los cuales al menos uno debe ser no nulo. Debe aclararse que el uso de la unidad imaginaria no es exclusivo del mundo cuántico o de los esquemas teóricos de altas dimensiones, puede encontrarse en teoría electromagnética, en la descripción fasorial de la corriente alterna, y en otros muchos campos de la física.

Pero esta aplicación del número imaginario i , con los complejos, no acaba aquí, sino que se generaliza con los llamados cuaterniones, extensión de los números reales, similar a la de los números complejos, añadiendo las unidades imaginarias i, j, k a los reales, con la propiedad operacional de $i^2 = j^2 = k^2 = -1$.

Y como se notaba anteriormente la importancia de la unidad imaginaria, también los cuaterniones son importantísimos en física: en el electromagnetismo, la teoría de la relatividad, la mecánica cuántica, mecánica del medio continuo, mecánica analítica, etc. También son muy usados en gráficos por computadora para representar la orientación de un objeto en un espacio tridimensional, procesamiento de imágenes, cinemática y dinámica robotica, etc.

Hamilton en 1843 descubrió los cuaterniones al intentar extender los números complejos a un número de mayores dimensiones, con lo cual gano una herramienta muy valiosa.

Debe también aclararse que existen esquemas teóricos en los cuales no se puede sustituir la unidad imaginaria, sabemos que la familia de todos los posibles estados de un sistema cuántico constituye lo que se conoce como espacio de Hilbert, y un espacio de Hilbert es un espacio vectorial complejo. Cada posición alternativa que puede tener la partícula cuenta como algo que aporta una dimensión independiente al espacio de Hilbert. El estado general que describe la posición cuántica de la partícula es una superposición con coeficientes complejos de todas estas diferentes posiciones individuales (la función de onda de la partícula).

Así, vemos que los números imaginarios son insustituibles en mecánica cuántica, en especial para el estudio de los estados de espín (momento angular o rotación) de las partículas y por lo tanto en todos los procesos de cuantización de las teorías físicas.

Para continuar, se ilustrará de forma sucinta un esquema teórico de altas dimensiones el cual ha llamado la atención a muchos investigadores, ya que plantea una aproximación diferente al concepto y análisis de dimensiones adicionales[10].

3 El universo brane

El modelo de universo membrana o de braneworld es una construcción teórica que involucra dimensiones adicionales extensas, es decir no compactificadas, y que trata de conservar los principios y leyes físicas plenamente conocidas. Estos modelos ofrecen algunas novedosas e interesantes perspectivas en la explicación de algunos aspectos del universo observable. Varios autores consideran la posibilidad de que alguna de las dimensiones adicionales pueda ser extensa e incluso infinita, contrario a la idea de dimensiones compactas, consideradas anteriormente, en dichas dimensiones extensas la interacción gravitacional tiene lugar en todo el espaciotiempo de alta dimensionalidad, en tanto que las otras interacciones, es decir las del ME, quedan restringidas a las cuatro dimensiones convencionales. La consecuencia inmediata es que en un futuro cercano, se puedan encontrar posibles evidencias de las dimensiones adicionales en los colisionadores de partículas a energías de TeV (energía alcanzable por el LHC)[11][12][13].

De los varios modelos de brane o membranas, tenemos uno en particular, el modelo Randall-Sundrum, cuya motivación original fué la solución del problema de jerarquías de la física de altas energías. Este modelo consiste en un espaciotiempo Anti-de Sitter de cinco-dimensiones, de máxima simetría espacial (es decir, que conserve la simetría esférica), con constante cosmológica negativa; dicho modelo en los últimos años ha conducido a desarrollos teóricos que han ocasionado un gran impacto, sobre todo en

teoría de cuerdas, física de partículas y cosmología. Randall y Sundrum introdujeron dos modelos, en el primero consideraron dos branes con tensión opuesta, sumergidas en un espaciotiempo de cinco dimensiones con constante cosmológica negativa, pero, debido a un factor en el tensor métrico, las partículas se localizan en la brane de tensión negativa, adquiriendo una gran masa, en comparación a la escala fundamental de masas, con lo cual la cosmología sobre esta brane, es insatisfactoria, porque la densidad de energía de la materia presente en la brane debe ser negativa, violando la condición de energía débil, esto muestra algunas limitaciones, pero en el segundo modelo propuesto, únicamente se considera una brane, de tensión positiva y la dimensión extra se hace infinita, siendo consistente este modelo con experimentos gravitacionales actuales, prediciendo correcciones al potencial gravitacional Newtoniano a cortas distancias, como también algunas desviaciones de la evolución estándar del Universo, como por ejemplo, edad del Universo o, abundancia de elementos livianos, estas consecuencias y otras más han permitido brindar otras explicaciones a fenomenologías observadas hoy día. Todo ello ha despertado y fomentado el interés de investigar y desarrollar modelos teóricos basados en el universo membrana. Uno de los logros del modelo de Randall y Sundrum ha sido mostrar que para geometrías no factorizables en cinco-dimensiones, allí existen estados simples, acotados sin masa, en paredes de dominio o en branes de tres dimensiones, los cuales se asocian a los modos cero de la reducción dimensional de Kaluza-Klein y corresponden al gravitón cuatri-dimensional. El marco geométrico de este escenario es un espaciotiempo de cinco-dimensiones tipo Anti-d Sitter (bulk) con una tri-brane inmersa en él, donde los campos de materia están confinados a la brane donde la gravedad Newtoniana se recupera a grandes distancias. Aun recientemente era convencional asumir que tales dimensiones extras estuviesen compactificadas en variedades con un pequeño radio del orden del inverso de la escala de Planck, $\ell_p = M_P^{-1} = G_N^{1/2} \sim 10^{-33}$ cm, de tal forma que permanecen ocultas a los experimentos. Sólo, recientemente es que ha surgido el interés de investigar que tan grandes son estas dimensiones sin que entren en conflicto con la observación, y todavía más interesante, cuando y como estas dimensiones extras pueden manifestarse en si mismas. Se han desarrollado modelos en los cuales las dimensiones extras están en el orden de los milímetros permaneciendo sin embargo ocultas a los experimentos, o quizá la alternativa más viable sea el modelo de dimensiones extras no compactas o de tamaño infinito como es el caso ya mencionado del modelo de Randall-Sundrum[8][9][10].

Algunas otras cuestiones que surgen son: Por qué y cómo el tamaño de la dimensión extra compacta o extendida permanece estable, como es la localización del gravitón

sobre la brane, a que tipo de cosmología conduce realmente la consideración de branes, como se puede someter a prueba uno de estos modelos, cuales son las nuevas consecuencias físicas de estos modelos, estas y otras cuestiones son las que se indagan bajo este nuevo esquema teórico[14].

Las teorías de dimensiones extras en general, y los modelos de Braneworld en particular, son un camino indispensable para aproximarnos al entendimiento de la gravedad, post-Einstein, es decir la gravedad entendida hoy día con toda su fenomenología observada. Las dimensiones extras suministran una aproximación a la gravedad modificada sin abandonar la relatividad general de Einstein. Además el paradigma del braneworld permite construir modelos que hacen posible incorporar las restricciones físicas del modelo estándar de partículas y del modelo estándar de la cosmología, y entre otras cosas, permite realizar una aproximación a la solución de problemas como el de la constante cosmológica, de jerarquías, problema de la materia oscura y de la energía oscura, y otros posibles fenómenos físicos. Finalmente se recalca que el estudio de los modelos braneworld ha llegado a ser un tema muy fructífero, involucrando varias áreas de la física teórica. Es también menester decir, que muchas de las principales corrientes de investigación obedecen a ideas especulativas más que a hechos bien establecidos, no obstante, pasa como con cualquier otra especulación física, el estudio del braneworld es guiado por los principios de la física y de la consistencia matemática, y por las posibilidades de conectar estos modelos con teorías más fundamentales y así con experimentos en un futuro cercano.

4 Conclusiones

Finalmente y resumiendo, ¿cuál es la aportación básica de la introducción de las dimensiones extra en nuestro mundo, en particular, en nuestra ciencia?... Pues, ha sido la “historia” de una “geometrización” progresiva de la física, que ha coadyuvado a un desarrollo matemático poderoso en las teorías de campo, relatividad, cuántica, teorías de cuerdas, branas, etc. Entre otras cosas, un aspecto importante tiene que ver con una búsqueda intensa de explicaciones satisfactorias y de esquemas teóricos fundamentales, talvez el universo efectivamente es geométrico, es decir que las leyes naturales son geométricas, pero a la fecha no tenemos sino evidencia circunstancial, por lo tanto no tenemos certeza sobre el fundamento mismo de las leyes naturales. Es probable que con las investigaciones del nuevo LHC, se logre dilucidar algún aspecto medible, verificable y concreto de las dimensiones adicionales. También debe decirse, que si la naturaleza misma es estrictamente matemática, cuestión de larga data, los resultados teóricos consistentes y guiados por las matemáticas describen un uni-

verso en altas dimensiones. Pero, ya desde un punto de vista un tanto filosófico, o de forma más pragmática, no deberíamos pensar que realmente han “aparecido nuevas dimensiones” físicas palpables en nuestro universo cuatridimensional espacio-temporal. . . Las dimensiones “extras” son realmente un “artificio matemático” muy potente para explicar y cuantificar los fenómenos o acontecimientos, estos sí reales, que aparecen a nuestro alrededor, como: las masas de las partículas, los efectos electromagnéticos, gravitacionales, interferenciales, etc. Nuestro mundo real, “histórico”, basado en sucesos o acontecimientos, sigue siendo cuatridimensional (tres dimensiones espaciales y una temporal). Pero igualmente puede pensarse que tenemos hoy una serie de observaciones fundamentales que no encuentran explicación satisfactoria en el marco de las teorías convencionales por lo cual se ha adoptado en algunos ambientes explicaciones basadas en dimensiones adicionales.

References

- [1] Las sombras de la mente, Roger Penrose (Crítica).
- [2] Los números imaginarios (A ciencia abierta. com).
- [3] Realidad y números imaginarios (Libro de notas. com).
- [4] “Cuaternión”, “Teoría de Kaluza-Klein”, “Variedad de Calabi-Yau” (Wikipedia).
- [5] Sobre las dimensiones extra espaciales (<http://www.journal.lapen.org.mx>).
- [6] Nuestro Universo, Alejandro Álvarez Silva. (Bibliopía.com).
- [7] La Relatividad, Paul Couderc (Ed. Universitaria de Buenos Aires).
- [8] Martens, R., “Brane-World Gravity”, *Living Reviews in Relativity*, gr-qc/0101059
- [9] Randall, L., and Sundrum, R., “An Alternative to Compactification”, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 4690-4693, (1999)
- [10] Randall, L., and Sundrum, R., “Large Mass Hierarchy from a Small Extra Dimension”, *Phys. Rev. Lett.*, **83**, 3370-3373, (1999)
- [11] Maeda, K., Mizumo., and Torii, T ., “Effective Gravitational equations on a brane world with indeced gravity”, *Phys. Rev. D*, **68**, 024033-1-8, (2003)
- [12] Éanna, É., S. H. Henry, Tye., and Ira Wasserman, “Cosmological expansion in the Randall-Sundrum brane world scenari”, *Phys. Rev. D*, **62**, 044039, (2000)
- [13] Malcolm S. Longair, “Galaxie Formation”, Springer 1998
- [14] T. Padmanabhan, T. Roy Choudhury, *Ganeshkhind, Pune, India*, astro-ph/0212573v2, 2003.