

*REVISTA*  
*EL CLUB CUÁNTICO*  
No ESPECIAL-GEOMETRÍA Y FÍSICA

No 9, DICIEMBRE 2014

$$\left[ \frac{-\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right] \Psi = i \hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi$$



Editores: Marco Corgini Videla - Ingrid Torres Castillo

<http://elclubcuantico.blogspot.com>

## ÍNDICE

1. EDITORIAL	2
2. GEOMETRÍAS	4
3. EL BOSÓN DE HIGGS	9
4. ALGO SOBRE BIG-BANG Y LA TEORÍA INFLACIONARIA	12
5. TEORÍAS DEL TODO	20
6. POLARITONES. COMUNIÓN ENTRE MATERIA Y RADIACIÓN	27

## 1. EDITORIAL

En 1938, el filósofo francés Gastón Bachelard publica su obra “La formación del espíritu científico”<sup>1</sup>. En ésta, su autor, con fina agudeza, señalará correctamente aquello que caracterizará a la física a partir de las nuevas y emergentes teorías (relatividad y mecánica cuántica), cuestión vislumbrada ya con Lagrange, Laplace, Riemann, y otros físicos y matemáticos notables: “Volver geométrica una representación, esto es, delinear los fenómenos y ordenar en serie los acontecimientos decisivos de una experiencia es la tarea primordial en la que se funda el espíritu científico. De hecho, es de ese modo que se llega a la cantidad representada, a medio camino entre lo concreto y lo abstracto, en una zona intermedia en que el espíritu busca conciliar matemática y experiencia, leyes y hechos. Esa tarea de geometrización que muchas veces parece realizada [...] acaba siempre por revelarse insuficiente. Más, tarde o temprano, en la mayoría de los dominios, es forzoso constatar que esa primera representación geométrica, fundada en un realismo ingenuo de las propiedades espaciales, implica ligazones más ocultas, leyes topológicas menos solidarias con las relaciones métricas inmediatamente aparentes, en resumen, vínculos esenciales más profundos de los que se acostumbra encontrar en la representación geométrica. Se siente, poco a poco, la necesidad de trabajar sobre el espacio, en el nivel de las relaciones esenciales que sustentan, tanto al espacio como a los fenómenos [...] El papel de las matemáticas en la física contemporánea, supera pues, de modo singular la simple descripción geométrica [...] el matematismo ya no es descriptivo sino formador. La ciencia

---

<sup>1</sup>G. Bachelard. *La formación del espíritu científico. Contribución para un psicoanálisis del conocimiento* (en portugués). Contraponto Editora Ltda. Río de Janeiro, Brasil, 2005

de la realidad ya no se contenta con el “cómo” (las cremillas son más) fenomenológico; ella busca el por qué matemático” (traducida de la edición en portugués directamente).

En la práctica, y en el sentido de lo expresado por Bachelard, la primera mitad del siglo XX fue testigo de la ya definitiva inclusión de las matemáticas como herramienta insustituible de la ciencias físicas. Todas las teorizaciones y descubrimientos de la física del siglo XX y XXI tienen esa impronta.

Nuestro interés en este número ha sido, con una breve pincelada, esbozar lo que ha sido la historia de la geometría, uno de los soportes más importantes de la física actual y hacer referencia a algunos de los logros y avances más significativos en esta ciencia, observándolos desde la perspectiva de su propia evolución histórica. Finalmente, el último artículo se refiere a los sorprendentes “polaritones” pseudo-partículas” generadas al interior de materiales semiconductores, estructuradas a partir de materia y energía-.

Aprovechamos, en este punto, de agradecer a todos los lectores de esta revista, cuya página, a la fecha, a superado las cuatro mil visitas. Nuestro propósito ha sido y será hacer asequible no sólo la ciencia, sino la cultura en general a un espectro amplio de personas, sin perder por eso la necesaria rigurosidad.

M. Corgini Videla

## 2. GEOMETRÍAS

La geometría de la antigüedad, la de los babilonios y otras culturas es meramente empírica y práctica.

Es con los griegos, a partir del siglo V antes de Cristo que ésta se vuelve, con Pitágoras y Euclides, axiomática y la deducción y demostración rigurosa de las proposiciones que la componen, a partir de éstos personajes, se constituye en imperativo.

En la geometría euclidea la curva de longitud mínima que une dos puntos dados es la recta, en un mundo que se percibe plano.

Así por ejemplo, en su quinto axioma, incluido en la obra “Elementos” de Euclides, se establece que por un punto exterior a una recta, sólo puede trazarse una paralela a ésta (quinto postulado).

Muy en el futuro, otros matemáticos omitirán este axioma o sencillamente lo sustituirán por otro generando nuevas geometrías (elíptica, hiperbólica).

Será sólo a partir de Descartes en el siglo XVII que esta disciplina tendrá un nuevo y fundamental impulso a partir del desarrollo de la geometría analítica.

Descartes introdujo el concepto de coordenadas espaciales, lo cual conduce en el ámbito de las matemáticas a conceptos tales como “espacio”, “conjunto”, etc.

Esta nueva geometría se constituirá en instrumento y herramienta indispensable no sólo de la nueva matemática que emerge sino principalmente de la física.

A partir de entonces y en el contexto de la mecánica de Newton tendrán importancia significativa los denominados sistemas inerciales, es decir, asociados sistemas de referencia en reposo o movimiento rectilíneo uniforme.

Aquí, las relaciones que vinculan las coordenadas de un sistema de referencia con las de otro del mismo tipo, se denominan “transformaciones de Galileo”.

La aparición en el siglo XIX de la denominada “Geometría Proyectiva”, que no es más que el estudio de las proyecciones de subconjuntos del espacio euclideo sobre planos, conducirá a la utilización de nuevos e importantes conceptos matemáticos tales como los de “grupo” e “invariancia” a partir de trabajos de Galois y Cauchy quienes introdujeron inicialmente esas nociones para estudiar permutaciones de conjuntos finitos de objetos.

Felix Klein, en esta época, manifestará que la estructura de grupos es la esencia de toda doctrina geométrica. Éstas se entenderán entonces como el “conjunto de los invariantes de cierto grupo de transformaciones”.

Por lo tanto, si una geometría está determinada por un grupo de transformaciones, por ejemplo rotaciones, traslaciones, etc., cada sistema

de referencia dado se relaciona con los demás aplicando sobre él elementos de tal grupo de transformaciones. En otras palabras, las nociones geométricas son expresiones analíticas, desde un punto de vista matemático, que son percibidas de la misma manera por todos los observadores, es decir, son transmisibles de un sistema de referencia a otro a través de un “cambio de coordenadas”.

Esto claramente hace factible una física del mundo, pues los fenómenos físicos deben ser independientes de los sistemas de coordenadas usados por los observadores. De no ser así, cualquier conocimiento de la realidad externa sería imposible.

Es claro que bajo estos preceptos, el concepto de “longitud”, que deberá ser un invariante respecto de cambios de coordenadas o sistemas de referencia, dependerá ahora del tipo de geometría del espacio que se considere. La forma de medirla quedará asociada a la geometría a partir de una función matemática que pasará a denominarse “métrica” o “función distancia”.

Gauss había sentado en 1827 las bases fundamentales de lo que hoy denominamos geometría diferencial, a través de su artículo “Disquisiciones Generales sobre Superficies Curvas”, basado en el cálculo diferencial desarrollado por Newton y Leibnitz.

En este mismo siglo, los matemáticos ruso Nikolai Lobachevski y alemán George Riemann, extenderán los conceptos geométricos conocidos a superficies en tres y más dimensiones, en donde los axiomas básicos de la geometría clásica euclidea dejan de tener validez: las rectas pueden

cortarse en más de un punto, las paralelas no mantienen entre sí la misma distancia, etc.

Riemann pondrá a la geometría euclideana en un contexto más general, introduciendo además el concepto de variedad.

Si suponemos que somos habitantes, muy pequeños en tamaño, de la superficie de una esfera, suficientemente suave y pulida y de enorme diámetro, sobre todo comparado con nuestra altura, la cual no podemos cruzar excavando agujeros ni saltar a través del espacio exterior para desplazarnos de un punto a otro sobre la misma, seguramente tendremos la percepción, al caminar de un lugar dado a otro diferente en nuestro vecindario, que paseamos sobre un plano y ahí la geometría, la que nos interesa para nuestro cotidiano vivir, es la euclideana, la geometría plana.

Sin embargo, para enormes distancias, comparables por ejemplo al radio de la esfera, la curva que une dos puntos dados sobre esa nueva tierra y que tiene longitud mínima, no será una recta.

Es decir, este mundo tendrá localmente la estructura de un espacio euclideano y globalmente una estructura geométrica diferente. Esto es una variedad diferenciable.

En estos casos, las curvas que hacen mínima la distancia entre puntos dados se denominarán “geodésicas” y derivar una expresión analítica para las mismas (no necesariamente únicas) corresponde a obtener soluciones de un problema matemático de extremos.

El llamado “tensor de curvatura”, asociado a una métrica de Riemann, será la herramienta matemática destinada a determinar cuánto varía ésta respecto de la plana de Euclides. El que esa cantidad sea nula es la condición necesaria y suficiente para que dicha métrica sea localmente euclídeana.

De aquí en adelante, la ciencia contará con una potentísima herramienta, la “geometría de variedades diferenciables”. Aquí los sistemas de coordenadas no están definidos sobre todo el espacio. De hecho, estas concepciones, consideradas por mucho tiempo como excentricidades, fuera del mundo real, constituirían en la primera mitad del siglo XX el fundamento de una de las teorías físicas más exitosas, la “relatividad general”, desarrollada por Albert Einstein con la ayuda del matemático Marcel Grossman y publicada en Alemania el año 1915.

### 3. EL BOSÓN DE HIGGS

El físico escocés Peter Higgs estableció en 1964 un mecanismo mediante el cual las partículas elementales adquirirían su masa. Esto ocurriría a través de la interacción de éstas con un campo desplegado a través del universo, diferente a los conocidos, el denominado campo de Higgs, cuya partícula mediadora sería un bosón del mismo nombre.

Los físicos Steven Weinberg en 1967 y Abdus Salam en 1968 hicieron uso de dicho mecanismo para explicar la obligada elevada masa de las partículas W y Z, mediadoras de las fuerzas débiles, prescritas por el denominado modelo estándar de la física de partículas, en consideración a que argumentos de simetría exigían que carecieran de ella. Así, la masa aparente de dichas partículas se entendería como prestada por otras.

Efectivamente, del mismo modo en que las partículas portadoras de fuerza median las interacciones conocidas, el bosón de Higgs posibilitaría que su campo, desplegado sobre nuestro universo, hiciera de la presencia de la masa una característica del mismo, permitiendo de paso la existencia de galaxias, la vida y todo aquello que nos es familiar. Una vez que las partículas W y Z fueron descubiertas experimentalmente, se dio inicio a la búsqueda de dicho bosón.

En este escenario, el año 2012, fuimos testigos de un descubrimiento asombroso. El CERN (Laboratorio Europeo de Física de Partículas Elementales) informó que los experimentos ATLAS y CMS realizados en el gran colisionador de hadrones (LHC) en Ginebra, permitieron detectar la existencia de una nueva partícula de espín entero, es decir, un

bosón de masa cercana a los 125 gigaelectronvoltios. Esto significa que su masa es muy grande comparada con otras partículas subatómicas y, por lo tanto, detectable sólo a energías muy altas como las producidas precisamente en el LHC a través de colisiones entre protones –componentes de los núcleos atómicos– a velocidades muy cercanas a las de la luz, es decir, por medio del choque de hadrones. Dichas energías cercanas a los 14TeV (14 mil millones de electronvoltios) superan en el doble a las producidas por otros aceleradores, como el Tevatron en el Fermilab de Chicago.

El modelo estándar predice la aparición o manifestación de esta partícula precisamente a energías de esa magnitud. De hecho, se trata de la única partícula descrita por éste cuya existencia debe confirmarse experimentalmente.

Como hemos explicado en otros números de REC, las partículas en la naturaleza pueden ser clasificadas entre bosones y fermiones, poseyendo los primeros espín entero (por ejemplo los fotones) y los segundos espín fraccionario (como los electrones, de espín  $1/2$ ).

De acuerdo a los antecedentes entregados por los investigadores del CERN, a la fecha de la noticia, dos de los canales (léase "modos") en que decae o se desintegra la partícula descubierta corresponden a algunas de las formas en que debiera hacerlo el esquivo y buscado bosón de Higgs.

Si en el futuro los experimentos indican que la partícula no se desintegra en los restantes canales predichos por la teoría estándar, podríamos no

encontrarnos en presencia del Higgs tal cual fue teorizado, sino quizás ante una variación de éste.

El bosón de Higgs debería tener espín nulo. En otras palabras, de existir, sería un campo del tipo denominado “escalar”, con “paridad” positiva, rasgos que caracterizarían su comportamiento físico. De no verificarse estas condiciones, la partícula observada en 2012 sería evidentemente diferente a la predicha, hecho que haría necesaria una revisión exhaustiva de la teoría estándar. En este último caso, podría suceder que, o bien el mecanismo a través del cual se genera la masa es más complejo que lo supuesto originalmente o que estamos en presencia de una nueva clase de partícula o partículas, actualmente desconocidas.

Sin embargo, cabe destacar que los resultados están, con las debidas reservas, siempre necesarias en ciencia, en concordancia con aspectos importantes de la teoría.

Cientos de científicos trabajan en el CERN escudriñando una realidad espeluznante, desarrollando experimentos destinados a determinar la estructura fina del universo. Hoy, el ser humano ha dado un paso gigantesco en este sentido, sea cual sea el resultado final de los análisis futuros. Se trata de una aventura monumental del conocimiento y la audacia técnica.

Éstas y otras iniciativas experimentales abrirán nuevos caminos a la investigación y validación, reformulación o abandono de modelos en distintas áreas de la física.

#### 4. ALGO SOBRE BIG-BANG Y LA TEORÍA INFLACIONARIA

Recordemos que la teoría general de la relatividad estableció en forma definitiva que la geometría es elemento estructural del universo en que habitamos y que la presencia de materia altera la curvatura local del espacio que la circunda, determinando de paso el vínculo indisoluble entre estos elementos y la gravitación. Así, cuando caemos, aquello que en un tiempo entendimos como fuerza, pasó hoy día a ser el efecto que sobre nosotros produce la distorsión del espacio que nos es cercano, causado por la presencia de un objeto de masa tan grande como la Tierra.

Esta teoría, incluida su versión ligeramente modificada por medio de la denominada “constante cosmológica”, describe excepcionalmente bien el comportamiento del sistema solar y otros fenómenos astronómicos importantes, como el de aquéllos constituidos por dos estrellas orbitando en torno a su centro de masa, una de las cuales es de neutrones y emite fuertes emisiones de radio (sistemas pulsares binarios).

Basado en la teoría de la relatividad general, el matemático ruso Alexander Friedmann propuso, entre los años 1922 y 1924, a diferencia del propio Einstein quien consideraba al universo como estático y de un tamaño fijo para lo cual incluso introdujo su famosa constante cosmológica, un modelo que consideraba un espacio con una distribución uniforme de materia y en expansión. Esto establecía dos escenarios

posibles: que la expansión se mantuviese indefinidamente o que el universo sufriese finalmente una contracción, regresando así a su estado inicial.

Fueron las observaciones experimentales del astrónomo estadounidense Edwin Hubble, en 1929, las que respaldaron fuertemente la hipótesis de la expansión del universo, supuesto que ya contaba con indicios importantes aportados por Vesto Slipher en 1917.

El corrimiento al rojo de las líneas espectrales en la luz emitida por galaxias lejanas, detectado por Hubble, indicó que éstas se alejan a grandes velocidades de nosotros sugiriendo que, en algún momento, en el pasado lejano, toda la materia debió encontrarse más o menos próxima y en un espacio reducido, comenzando repentinamente a expandirse. Es a ese instante al que se designa como “Big-Bang”.

Hubble estableció también una relación de proporcionalidad entre la distancia de cada galaxia y su velocidad, lo que pasó a denominarse “Ley de Hubble”. La constante de proporcionalidad respectiva es la que hoy día conocemos como “constante de Hubble”.

Este proceso de evolución del universo se materializa sin considerar un punto específico de surgimiento, por cuanto espacio y materia emergen y se expanden en forma simultánea, como si se tratara de un globo que se infla, sin referencia a un afuera ni a un interior a su superficie.

Los actuales modelos cosmológicos se basan en aquéllos generados inicialmente por: Friedmann, el físico y sacerdote belga Georges Lemaître

en el período 1930-1931 y los físicos estadounidense Howard Robertson e inglés Arthur Walker en 1935.

Cabe señalar que Einstein, partidario de un universo estacionario, tal como fue señalado, aunque consideró correctos los cálculos matemáticos tanto de Friedmann como de Lemaître, desestimó durante muchos años las conclusiones de carácter físico de sus trabajos.

Dependiendo del valor de la denominada “curvatura del espacio”, se deducen tres diferentes situaciones en estos modelos: Si su magnitud es positiva, se trata de un universo equivalente, desde un punto de vista geométrico, a una superficie “esférica” en tres dimensiones; si es igual a cero, se trata de una geometría del tipo euclídeana, es decir el cosmos es plano; el caso en que la curvatura resulta negativa, corresponde a una geometría de tipo “hiperbólica”.

Los tres modelos consideran un estado inicial en que la curvatura geométrica y la densidad de materia son cantidades infinitas.

El primer caso el universo colapsa en lo que se denominará el “big crunch” (en otras palabras, rebota para volver a la singularidad inicial), en las otras dos situaciones, sencillamente evoluciona en forma infinita.

La detección de un fondo de microondas en el universo (radiación de fondo cósmico-RFC), realizada en 1964 por Arno Penzias y Robert Wilson dio sustento experimental a la hipótesis de George Gamow, Ralph Alpher y Robert Hermann, postulada en los años cuarenta del siglo XX, sostenida sobre la base de una teoría convencional del Big Bang y revisitada (sin conocimiento de los trabajos previos de Gamow

y colaboradores) por los cosmólogos Robert Dicke y James Peebles en Princeton más de una década después, consistente en que radiación remanente de este suceso originario debiese ser perceptible en nuestro fondo cósmico actual.

Esta huella imborrable, generada en los primeros tiempos del universo, tuvo su origen en un escenario dominado por altísimas temperaturas.

Nuestro cosmos en esa época habría sido en realidad un plasma compuesto de electrones, bariones (neutrones y protones) y fotones, en donde los primeros, imposibilitados de unirse a los segundos, se mantenían en interacción permanente con los fotones a través de un proceso de dispersión (scattering).

La liberación de los fotones de este proceso de colisión continua se habría producido finalmente como efecto colateral de una disminución paulatina de la temperatura, la que facilitó la unión de electrones y protones para formar hidrógeno. Es esta situación, denominada “nucleosíntesis de elementos livianos” (que luego seguirá con la formación del helio y otros átomos que nos son familiares), la que habría permitido a los fotones desplazarse sin chocar con los electrones, produciendo lo que hoy conocemos como radiación de fondo cósmico.

Antes de producirse el desacoplamiento entre radiación y la materia (fotones y electrones se encontraban acoplados), ambas se habrían encontrado en equilibrio térmico con un espectro de cuerpo negro de igual temperatura a la de los bariones. Se trataba de un universo opaco.

Luego del último scattering con los electrones, el universo se habría vuelto “transparente” a la radiación.

A modo de aclaración, un cuerpo negro es aquel que absorbe la energía sin reflejarla, produciendo sólo radiación térmica.

El lector interesado podrá encontrar información respecto de este proceso en cualquier texto de divulgación científica serio dedicado a estos temas (ver por ejemplo [1,2]).

En resumen, las características más importantes de la RFC son la concordancia entre el espectro de frecuencias de ésta con el de la denominada “radiación de cuerpo negro” y la uniformidad con que se distribuye en el universo, es decir, la radiación observada debiera proceder de un estado en “equilibrio térmico”.

Con objeto de resolver algunos de los problemas asociados a la teoría del Big Bang-específicamente en lo referido al instante en que éste comienza<sup>2</sup>-, el físico estadounidense Alan Guth desarrolló el año 1981 la denominada teoría de la “Inflación Cósmica”. Si bien hasta nuestros días la conjetura tuvo modificaciones, en lo esencial se ha mantenido la hipótesis original respecto de la existencia de un campo escalar bautizado como “inflatón”, cuya partícula asociada lleva el mismo nombre, que habría dominado sin competencia en los primeros instantes del universo.

Sometido a fluctuaciones cuánticas, este campo habría dado origen a la repentina expansión cósmica y a la variación en la distribución de

---

<sup>2</sup>RECC No. 6, 11-21, 2014

materia en el universo que posteriormente resultaría responsable de la aparición de las estructuras galácticas que hoy conocemos.

La pérdida de energía del mencionado campo con el transcurso del tiempo –muy breve por lo demás– se habría traducido en la desintegración de su partícula, resultando en la consecuente producción de partículas normales. Es en este momento cuando habría emergido el “universo caliente”.

En este punto, la energía (potencial) del inflatón se habría transferido a la radiación. Este proceso se tradujo en la homogeneidad de la radiación de fondo cósmica (RFC, fondo de microondas o CMB en inglés-cosmic microwave background, remanente del proceso de expansión inicial) que permea nuestro universo, detectada hace ya muchos años y antecedente que respalda la teoría del Big Bang. De esta forma, una vez finalizada la época inflacionaria, la evolución del universo es descrita en esta teoría por la teoría estándar del Big-Bang.

Esa abrupta etapa inflacionaria sería la razón por la cual el universo se “aplanó”, tal cual se determinó a partir del análisis de los datos obtenidos por los satélites COBE (Cosmic Background Explorer) y WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) durante los últimos decenios.

El astrofísico inglés Martin Rees predijo en 1968 que cierta “polarización” u “orientación” de la radiación de fondo, conteniendo información acerca de la dinámica de las inhomogeneidades iniciales presentes

durante los primeros cientos de miles de años del universo –responsables de las actuales estructuras galácticas– debiera ser observable. El año 2002, se anunció, el descubrimiento de dicha polarización.

Por otra parte, la transición desde la etapa de inflación a la de recalentamiento habría producido enormes ondas de choque acompañadas de la transformación de parte importante de la energía liberada en ondas gravitacionales, desplazándose libremente luego de su separación del plasma. Éstas suelen ser descritas como “arrugas” en la estructura del espacio-tiempo, cuya existencia podría ser detectada en nuestros días a través de una señal asociada precisamente a la “polarización” registrada en la RFC. Así, una forma de confirmar aspectos importantes de la teoría se refería además a la detección de ese fondo de ondas gravitacionales generadas después de la expansión y que debiera atravesar el universo.

Quizás apresuradamente, los días 17 y 18 de marzo de 2014, científicos hicieron públicos dos artículos asociados a los análisis realizados a los datos recabados desde el polo sur por el observatorio BICEP 2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization), indicando la identificación de “ondas gravitacionales primordiales” (modos B primordiales) [3].

Obviamente, el análisis de datos debía ser confirmado, como es natural en ciencias, por especialistas en todo el mundo. De haberse ratificado la validez de este resultado, éste habría constituido un momento crucial en el desarrollo de la física futura, no sólo como respaldo a las teorías y conjeturas actualmente vigentes, sino también como plataforma para

desarrollar nuevas estrategias para seguir develando los misterios acerca de los orígenes del universo.

Sin embargo, y en este contexto el 27 de octubre de 2014, el Cern Courier, comunicó que la información enviada por el satélite Planck, confirmó las dudas-aparecidas en el mismo Cern Courier en mayo de 2014)-respecto a que el campo usado para el experimento “Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization” (BICEP 2) destinado a medir la polarización del modo B del fondo cósmico de microondas se encontraba contaminado por emisión de polvo galáctico, de tal forma que la señal de polarización detectada, se debería, al menos en parte, a dicha situación y no a ondas gravitacionales primordiales.

### **Bibliografía**

- [1] R. Penrose. Ciclos del Tiempo. Random House Mondadori, S.A. España, 2010.
- [2] S. Singh. Big Bang. Biblioteca Burdán, 2004.
- [3] Polarization at degree angular scales. arXiv:1403.4302v1 (2014) Bicep II: Experiment and three-year data set. Bicep2 I: Detection of B-mode arXiv:1403.3985v2 (2014).

## 5. TEORÍAS DEL TODO

Durante los años veinte surge una teoría debida al físico polaco Theodor Kaluza<sup>3</sup>, en un intento por unificar las interacciones gravitatorias y electromagnéticas a través de la consideración de una nueva dimensión espacial. La misma suscitó un gran interés entre físicos de la época, incluido Albert Einstein. La nueva dimensión implicaba la inclusión de ciertos términos adicionales en el denominado “tensor simétrico”, característico de la relatividad general, lo que implica la introducción de un “vector” de carácter indefinido. Si bien los cálculos conducían a expresiones que contenían términos similares a aquéllos asociados a la denominada fuerza de Lorentz de una partícula cargada, característica del electromagnetismo, la estrategia de Kaluza fallaba en que uno de éstos no era de carácter tensorial, reflejando una inconsistencia importante de la estrategia. Por otro lado, algunos de los resultados parecían sugerir como razonable la existencia de un vínculo entre gravitación y electromagnetismo en este contexto.

No fue sino hasta 1926 en que el físico sueco Oskar Klein resuelve el problema<sup>4</sup>, modificando el trabajo de Theodor Kaluza, dando un sentido “tensorial” a sus resultados. Dos razones importantes transformaron al ahora denominado vector de Kaluza-Klein en un buen candidato para representar el campo electromagnético. La primera tenía relación con el hecho de que la llamada “geodésica cuatridimensional

---

<sup>3</sup>T. Kaluza. *On the Unification problema of Physics*. Sitz. Ber. Preuss. Akad. Wiss. (1921), 966.

<sup>4</sup>O.Klein. *Quantum Theory and Five Dimensional Relativity*. Zeit.f.Physik, 37 (1926) 895.

de Klein” –aunque personalmente prefiero el adjetivo tetradimensional– reproducía el término de la fuerza de Lorentz asociada al campo electromagnético. La segunda era que el elemento infinitesimal de línea resultaba invariante bajo ciertas transformaciones (“gauge”) para las cuales el potencial cuadridimensional electromagnético resulta también invariante.

Por otro lado, las ecuaciones del campo gravitacional de Einstein, son derivables de un “principio variacional” consistente en la minimización de la respectiva acción. Matemáticamente, se obtienen de resolver un problema de extremos, bajo el supuesto de que la acción asociada al sistema es estacionaria respecto de variaciones de sus variables. En este contexto, ¿qué sucedería con esta nueva estrategia?. El resultado fue sorprendente, la acción de cinco dimensiones conducía a la acción gravitacional cuadridimensional para el campo gravitatorio y el electromagnético, previsto que la quinta dimensión espacial fuese cilíndrica (compactificada). Con esto se evitaba el surgimiento de infinitos indeseados en los cálculos.

De esa forma, se identificó la quinta dimensión con una coordenada angular de período dependiente del radio del cilindro.

Se supuso adicionalmente que dicho radio era del orden de  $10^{-30}$  cm., magnitud muy cercana a la longitud de Planck ( $10^{-33}$  cm.), siendo así la quinta dimensión inobservable para cualquier humano. Esto significa que además del tiempo y las tres dimensiones conocidas -que cualquier ciudadano común reduce a largo, ancho y alto-, existiría una adicional, no representable por experiencia o intuición alguna. De esta

forma, de acuerdo a la teoría de Kaluza-Klein, nuestra realidad se encontraría constituida por las cuatro dimensiones ya conocidas (una de ellas el tiempo) y una “compactificada”, enrollada sobre sí misma (en un círculo de radio “ $r$ ” de dimensiones ínfimas), que no percibiríamos en la vida cotidiana, ya que la misma se encuentra “escondida” en un micromundo por ahora inaccesible.

Así, a nivel de las cuatro dimensiones no enrolladas, la quinta se manifestaría como una simetría local (transformaciones de gauge).

Con el tiempo, al no permitir realizar predicciones físicas, la teoría perdió interés y fue paulatinamente dejada de lado como candidata a “teoría del campo unificado”, modelo que debiera establecer el vínculo entre los cuatro campos asociados a las interacciones conocidas.

En 1950, Wolfgang Pauli intentó aplicar sin éxito este formalismo, en seis dimensiones, para unificar las interacciones fuertes y débiles.

Fue sólo en los años setenta, con la aparición de la mencionada anteriormente teoría de cuerdas, que los supuestos asociados a la existencia de dimensiones adicionales y la misma teoría de Kaluza-Klein recobraron fuerza.

De hecho en sus inicios, la teoría de cuerdas suponía la existencia de 26 dimensiones e incluía sólo el estudio de bosones, sin embargo, desarrollos posteriores, asociados al concepto de supersimetría, redujeron ese número a 10, aunque quedaba sin resolver un problema de unicidad de la teoría. Finalmente el año 1995, el físico y matemático estadounidense

Edward Witten propuso que tal situación podía ser resuelta agregando una dimensión más (en total 11).

Dada la alta energía necesaria para detectar las dimensiones extra, también compactificadas, se hace poco probable la verificación experimental de su existencia. Tales dimensiones deberían verse, al igual que en el caso de la teoría de Kaluza-Klein, como simetrías locales del tipo gauge mencionado.

Recordemos que, en lo esencial, la teoría de cuerdas postula que a muy altas energías las partículas conocidas corresponden en realidad a modos vibracionales de objetos denominados “cuerdas”.

Uno de los soportes de este modelo es que predice la existencia del esquivo gravitón, bosón de espín 2 y supuesta masa nula (¿o posee masa?<sup>5</sup>, que mediaría las interacciones gravitacionales.

En esta teoría, la partícula se asocia a las denominadas “cuerdas cerradas” mientras las conocidas corresponden a modos de “cuerdas abiertas”.

Por otro lado, el formalismo matemático subyacente permite resolver el denominado “problema de divergencias o infinitos” en las “integrales de caminos” (Richard Feynman) - destinadas éstas a describir la transición o evolución probable de sistemas cuánticos entre diferentes estados (teoría cuántica de campos)-, efecto indeseado atribuible al hecho de suponer una naturaleza puntual para las partículas elementales. En otras palabras, en el caso de la gravedad, la formulación de la teoría

---

<sup>5</sup>Koyama, G. Niz, and G. Tasinato. *Can the graviton have a mass?*. Int. J. Mod. Phys. D 20, 2803 (2011)

cuántica de campos no funciona, por cuanto el problema de los infinitos o divergencias no es solucionable. Técnicamente hablando, la teoría es “no renormalizable”.

En este caso, la denominada “teoría de cuerdas supersimétrica”, extensión de la teoría de cuerdas original, entrega resultados finitos.

Ésta establece la existencia, a muy altas energías, de una réplica, una compañera supersimétrica, asociada a cada partícula observable y cuyo valor de masa debiera ser inversamente proporcional al radio del círculo en que se encuentran curvadas las dimensiones extras. Dado que dichos radios son extremadamente pequeños, la masa de tales partículas sería enorme. Desafortunadamente, estas partículas serían detectables sólo a muy altas energías, actualmente no reproducibles experimentalmente.

En el contexto de las supersimetrías, en el caso de la física de partículas elementales, el denominado “modelo superestándar” fundado en la teoría de grupos, representa una extensión del estándar que pretende explicar algunos de los aspectos no aclarados por él.

Sin desmedro de lo anterior, aquí el concepto de supersimetría ha tenido como objeto principal el avanzar hacia una teoría unificada de tres de las cuatro interacciones fundamentales, la electromagnética y la nuclear débil (fuerza electrodébil) con la nuclear fuerte. Esta teoría es la denominada “Susy-Gut” (“Super Symmetry and Grand Unified Theory”).

Análogo al caso de la teoría de cuerdas, el modelo superestándar establece la existencia, para cada partícula conocida, de una compañera

supersimétrica, con las mismas características de la primera –por ejemplo, masa y carga eléctrica– salvo una, el “espín”, que nos entrega información respecto de la forma en que la partícula se comporta bajo transformaciones tales como rotaciones y otras simetrías asociadas al llamado “grupo de Poincaré”. Asume además que el hecho de que tales objetos físicos sean inobservables a las energías actualmente asequibles, es un indicio importante a favor de la “ruptura” de tal simetría, la cual tendría como causa una diferencia notable entre las magnitudes de las masas de las partículas conocidas y las de sus compañeras supersimétricas (mucho mayores). Si recordamos que de acuerdo a una muy famosa ecuación debida a Einstein, la energía es proporcional a la masa, siendo la constante de proporcionalidad la velocidad de la luz al cuadrado, resulta razonable suponer que a altas energías la materialización de una partícula, no presente a las energías habituales en nuestro cosmos, debería estar asociada a una masa de gran magnitud. En este sentido, la supersimetría sería una simetría “a medias” o, en términos más elegantes, “no exacta”. El modelo predice la existencia del gravitón y su compañero supersimétrico, el gravitino, del gluón y el gluonino, etc.

Es necesario precisar que aquí el concepto de supersimetría se encuentra fuertemente asociado al de espín (un número racional), característica común a todas las partículas conocidas en la naturaleza que, ya sabemos, se clasifican en fermiones y bosones. Los primeros tienen espín fraccionario y los segundos entero. Por ejemplo, un electrón (fermión) tiene espín  $1/2$  y un fotón (bosón) posee espín 1. La teoría del modelo estándar supersimétrico establece que sistemas de bosones pueden ser

“mapeados” en sistemas de fermiones y viceversa <sup>6</sup>. Se trata entonces de una simetría del tipo “bosón-fermión”. En este caso, el mencionado fotino, compañero masivo, supersimétrico del fotón, es un fermión de espín 1/2.

Finalmente, a diferencia de la teoría de cuerdas, se ha propuesto la denominada teoría de “gravidad cuántica de lazos”, donde son innecesarias las dimensiones extra y no introduce modificaciones a los principios de las teorías relativistas y cuánticas ya verificadas experimentalmente. Ésta no considera al espacio-tiempo como una estructura suave (variedad), sino como constituida por elementos discretos donde la unidad básica de longitud es la de Planck (por eso, actualmente, no resulta posible demostrar o refutar la validez de este modelo).

A pesar de que ha presentado resultados auspiciosos en el ámbito del cálculo de la entropía de agujeros negros en astrofísica y en su contexto la singularidad inicial asociada al Big-Bang no es un punto especial, hecho que tiene como consecuencia lo que se denomina el “gran rebote” o “big bounce”, no es posible recuperar la relatividad general a partir del límite clásico, lo que la hace en ese sentido, al menos por ahora, inconsistente.

---

<sup>6</sup>G. Benfatto, V. Mastropietro, P. Falco. *Massless Sine-Gordon and Massive Thirring Models: proof of the Coleman's equivalence*. Comm. Math. Phys. 285, 2, 713-762 (2009).

## 6. POLARITONES. COMUNIÓN ENTRE MATERIA Y RADIACIÓN

Los semiconductores son materiales que poseen la característica de comportarse como conductores o aislantes dependiendo de diferentes factores (presión, temperatura, campo eléctrico, etc.).

Al ser alcanzados por luz, electrones pueden ser eventualmente excitados y quedar ligados, por efecto de pozos cuánticos (interacciones eléctricas atractivas) presentes en el material, a los “huecos” que dejan, formándose de esta forma una pseudo-partícula conocida como excitón. Ésta desaparecerá en una millonésima de segundo, emitiendo, como resultado de esta desintegración, un fotón.

Confinadas estas pseudo-partículas entre las fronteras de “cavidades ópticas” en el mismo material, aquellos fotones emitidos al momento de su desintegración, pueden ser reabsorbidos por éste, dando lugar a la emergencia de un nuevos excitones. Si el tiempo de reabsorción es superior al de permanencia de fotones en la cavidad, se verifica un nuevo fenómeno denominado acoplo fuerte entre luz y materia. En este caso, los estados cuánticos asociados a los excitones atrapados en los pozos al interior de las cavidades que albergan a los fotones, y los estados a los cuales estos últimos se encuentran asociados, pueden acoplarse. Así, excitones y fotones dan lugar a partículas híbridas, denominadas “polaritones de cavidad”.

Es claro que estamos ante la emergencia de procesos de coherencia y decoherencia, siendo las fuentes de estas últimas las que se hace necesario cuantificar y controlar para permitir una vida más extensa de

los polaritones. De esta forma, la tarea actual de los investigadores ha sido la de determinar criterios destinados a favorecer el acoplo fuerte y disminuir las fuentes de su destrucción. La baja masa efectiva de los polaritones excitónicos (bosones) los convertiría en candidatos óptimos para la generación eventual de Condensación de Bosé Einstein a temperatura medioambiente.

Debido a que estas pseudo-partículas se encuentran confinadas en cavidades ópticas de materiales semiconductores, el sistema de partículas resultante es aproximadamente bidimensional.

Como todas las partículas de tipo bosónico, en el caso de sistemas infinitos de polaritones, es la misma interacción entre éstos la que propicia la ocupación macroscópica del estado fundamental del sistema (transición de Kosterlitz-Thouless con fase condensada). En la situación finita es suficiente la presencia de un potencial de confinamiento externo para producirla.

## EL CLUB CUÁNTICO

[www.youtube.com/elclubcuantico](http://www.youtube.com/elclubcuantico)

[www.goeat.com/elclubcuantico](http://www.goeat.com/elclubcuantico)

[www.twitter.com/elclubcuantico](http://www.twitter.com/elclubcuantico)

