



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

La relatividad como paradigma de la teoría
unitaria de campos

discurso pronunciado por el

Ilmo. Sr. D.

Pablo Hervás Burgos

en el acto de recepción como académico numerario
el día 31 de octubre de 1989

y

contestación del académico numerario

Ilmo. Sr. D.

Antón Civit Bren

LA RELATIVIDAD COMO PARADIGMA DE LA TEORIA UNITARIA DE CAMPOS

*Académico Numerario de la Academia
DISCURSO PRONUNCIADO POR EL ILMO. SR.
PABLO HERVAS BURGOS
en el acto de su recepción como Académico
Numerario celebrado el 31 de Octubre de 1989.*

Excmo. Sr. Presidente, Ilmos. Sres. Académicos, Señoras y Señores:

Antes de empezar el discurso, quisiera expresar mi agradecimiento a todos los miembros de la Academia Sevillana de las Ciencias por la distinción inmerecida con que me honra, al haberme elegido para ocupar una plaza como académico numerario de la Sección de Física. Con la esperanza de no defraudarles, paso a presentarles una somera visión, y hasta cierto punto personal, de la incidencia del pensamiento relativista en las teorías unitarias de las fuerzas naturales.

INTRODUCCION

Tal vez una de las huellas más profundas que nos han legado las distintas civilizaciones haya sido su “saber” o su grado de perfección en el conocimiento de las cosas. En un estado madurez del pensamiento humano, los griegos separaron, por primera vez, el conocimiento científico del simple saber o conocimiento vulgar, al exigir al conocimiento científico: la abstracción, la independencia de toda finalidad práctica, la primacía del conocer sobre el saber, el encadenamiento y la universalidad.

Bajo estos paradigmas, elevados a la categoría de estructura formal del conocimiento, los filósofos de Mileto concibieron como camino para la conquista intelectual de la realidad de las cosas el método hipotético deductivo. Esto es, a la construcción de un núcleo de hipótesis mediante los procesos de conjetura y crítica, donde cada hipótesis es un intento de superar lo que de inadecuado e incoherente tuviera la hipótesis anterior, sigue el establecimiento de un sistema conceptual cuyos miembros se encadenan lógicamente, “donde una verdad surge de otra

verdad y donde el todo sostiene el todo". Tanto las operaciones lógicas como, la coherencia del sistema, están avaladas por el principio de no-contradicción que, como sustituto del único criterio de verdad, adquiere la categoría de un principio ontológico en el discurso racional.

Con este molde del pensamiento, los griegos elaboraron el conocimiento científico en perfecta armonía, y hasta en simbiosis con la más compleja estructura de la realidad. El hecho contingente aparece como ley necesaria, el mito, la máxima y la norma técnica se reducen a puros elementos precientíficos. Fueron tantos los éxitos del modelo deductivo que se llegó a postular la identidad del pensar con el ser: "Lo que es real es racional y lo que es racional es real" (Zenón de Elea). El descubrimiento del número irracional puso límite a la total racionalización de la realidad en el mundo de los pitagóricos. Este hecho fue contemplado por la civilización helena como un desafío a la razón, pero de ningún modo como una invitación a descartar el método de los filósofos de Mileto.

El gran desarrollo del empirismo griego, a nivel cualitativo, no fue suficiente para frenar el racionalismo especulativo de la mente griega. Fueron necesarios varios siglos de madurez para que la experimentación adquiriese un nivel cuantitativo. Ello fué posible porque al final de este periodo, lo que el griego llamó "Episteme", fué sustituido por lo que nosotros llamamos "Ciencia". Fue necesario que Galileo renunciase a conocer el origen de la cosas y se limitase a determinar la medida de las variaciones temporales de las cosas en el curso de la Naturaleza. En este viraje del conocimiento físico, "el ser real" o tener existencia propia es reemplazado por un "puro acontecer" y "el llegar a ser por sus causas" por "la determinación matemática de los fenómenos"; sustituciones que hace posible la experimentación cuantitativa.

El método hipotético deductivo, que había quedado en el pensamiento griego como un programa a desarrollar, al incorporar la experimentación cuantitativa como norma única de selección de los elementos hipotéticos, se convierte en un método autosuficiente en la construcción del conocimiento físico. Así, en la elaboración de las teorías físicas, el método separa causas y efectos, analiza aisladamente unos de otros, los relaciona, los simboliza en principios y establece las bases matemáticas capaces de definir, en forma abstracta, lo que se mide y lo que se analiza, luego elabora los conceptos no primitivos, da leyes y teoremas y de ellos pasa al fenómeno natural.

Este proceso constructivo confiere a las teorías físicas los caracteres de estructura cerrada: la incoherencia entre un hecho real con algún elemento hipotético implica la sustitución o, al menos, la modificación conceptual del elemento hipotético. De esta suerte los hechos reales seleccionan, lo que Kant llama "la parte pura" de una teoría, pero esta parte pura, a su vez, es la que decide qué experiencias deben realizarse, y cuales de sus resultados son válidos.

A lo largo de la historia del pensamiento físico, hombres geniales han ido renovando los núcleos hipotéticos de las distintas teorías físicas y con ello han ido

jalonando sus cursos evolutivos. Durante la llamada crisis de la Física clásica se intentó dotar a las teorías físicas de principios suficientemente amplios y flexibles, para que los nuevos avances científicos no se reflejasen, como había ocurrido, en acciones destructivas de sus mismos cimientos. Se propuso excluir los elementos hipotéticos y establecer postulados plasmados de experiencias. Y si es cierto que el pensamiento físico de principios de siglo desechó mucho elemento hipotético a los márgenes de la Ciencia Natural, también es cierto que, si la Física quiso avanzar, tuvo que introducir nuevas hipótesis.

Esta especie de simbiosis entre el avance científico, y el cambio de marco teórico, que desde Galileo se ha manifestado en la Física, ha asociado al conocimiento físico el carácter de variable o cambiante. Pero que la Física sea provisional no es un reproche sino un elogio. Como dice Zubiri: "Una ciencia que se halla en la situación de no poder avanzar sin tener que retrotraerse a sus principios, es una ciencia que vive en todo instante de ellos. Es ciencia viva y no simplemente oficio" (1).

LA RELATIVIDAD: BOSQUEJO HISTORICO.

Se dice que no se comprende una teoría si no se captan las ideas que han llevado a construirla. En el caso de la Relatividad estas ideas fueron elaboradas en el curso evolutivo de la Física desde Maxwell hasta principios de siglo.

Maxwell realiza, de forma magistral, la síntesis de los campos eléctricos y magnéticos, descubre las ondas electromagnéticas, demuestra su carácter transversal y deduce que la velocidad de tales ondas coincide con la velocidad de la luz. Sin embargo, Maxwell fracasa al desarrollar la mecánica del éter; pero sus leyes, según el positivismo austriaco de Ernest Mach, son definitivas, independientes y libres de explicación alguna, pues el Círculo de Viena, sólo exige al conocimiento físico la descripción de los hechos experimentales, y no la explicación de la esencia de las cosas, Hertz (1887) extiende la teoría de Maxwell al movimiento de la materia y llega a la conclusión de que la Tierra en su movimiento arrastra al éter. Hecho en contradicción con el fenómeno de aberración de las estrellas, descubierto por Bradley (1727).

Para estudiar el electromagnetismo de los cuerpos en movimiento, Lorentz, establece la independencia del éter y de la materia, desarrolla la teoría estadística de los electrones, análoga a la teoría cinética de los gases, y extiende la teoría de Maxwell al interior del átomo, llegando así a una física de campo que reina hasta la escala más fina, en la que las entidades elementales se presentan como indivisibles y susceptibles de ser localizadas en una región casi puntual.

Michelson (1887) realiza el famoso "experimento del interferómetro" concebido para detectar el movimiento de la Tierra respecto al éter. Aumentando la sensibilidad

del interferómetro, repite el experimento seis años después en colaboración con Morley. Los resultados en ambos casos fueron negativos. Lorentz (1895), en un artículo sobre el experimento de Michelson, logra salvar la existencia del éter a cambio de admitir una contracción longitudinal de los cuerpos en la dirección del movimiento. En el campo teórico, Ernest Mach, (1883) pone en duda los argumentos de Newton sobre la concepción absoluta del espacio y del tiempo, inclinándose por su relatividad. Ante tanto fracaso de medir la velocidad de la Tierra respecto del “éter fijo”, Poincaré (1889) en una de sus conferencias en la Sorbona, propone la imposibilidad de detectar el movimiento absoluto por medios mecánicos, ópticos o electromagnéticos; proposición que defiende un año después en el C.I.F. de París. En el congreso de Artes y Ciencias de San Luis (1904), Poincaré, enuncia el Principio de la Relatividad tal como se conoce hoy día. Y añade “de estos resultados debe surgir un nuevo tipo de Mecánica que vendrá caracterizada porque ningún velocidad debe superar a la velocidad de la luz”. Por último en (1904), Lorentz extiende el Principio de Galileo a los fenómenos electromagnéticos y, por medio de las ecuaciones de Maxwell, obtiene las ecuaciones fundamentales de la Relatividad Restringida (2).

De lo expuesto, se deduce que la Relatividad es una conclusión lógica de un conjunto de hechos pertenecientes a la antigua teoría del éter y de los electrones. Su origen se suele simbolizar así: el fenómeno de aberración de las estrellas descubierto por James Bradley (1727) exigía un éter fijo, el experimento de Michelson-Morley (1887) exigía un éter moviéndose con la misma velocidad que la Tierra. Poner de acuerdo estos hechos contradictorios fué el origen de la Relatividad. Una vez que la Relatividad fué admitida como doctrina se procuró reducir y simbolizar en algunos principios. En otoño de 1905 Einstein, basándose en que los fenómenos electromagnéticos dependen, tan sólo, del movimiento relativo de imanes y corrientes y en la cinemática del sólido rígido, publica un artículo: “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”; reformulando, como primer principio, el principio de Poincaré, y como segundo la constancia de la velocidad de la luz. De estos dos principios deduce las fórmulas que Lorentz había obtenido un año antes a partir de las ecuaciones de Maxwell (3).

LO ABSOLUTO Y LO RELATIVO.

La síntesis de Lorentz explica de forma muy simple los continuos fracasos de medir la velocidad de la Tierra respecto al éter fijo. Sin embargo, aunque el propio Lorentz no lo admitiese, sus ecuaciones violaban directamente los conceptos de espacio y tiempo absoluto, que venían formando parte de nuestra herencia mental y que constituían uno de los elementos más sólidos de la Física de Newton y de la Filosofía de Kant.

NOTA: En este bosquejo histórico hemos seguido a Whittaker, físico de primera magnitud que fué testigo de la evolución del pensamiento relativista. (4)

El intervalo de tiempo entre dos acontecimientos deja de representarse por un mismo número, cuando las observaciones se hacen desde cuerpos con velocidades distintas. La proposición: dos acontecimientos ocurren en un mismo instante, sólo puede ser cierta para observadores situados en un mismo cuerpo, o en cuerpos con igual velocidad. En otro caso, la simultaneidad desaparece y la relación antes-después depende tan solo de la velocidad de los observadores. Al espacio le ocurre igual que al tiempo: el tamaño de un cuerpo, o la afirmación: dos acontecimientos ocurren en un mismo lugar, carecen de sentido si no se dice la velocidad relativa del cuerpo desde el cual se hace la observación.

La contracción de la longitud de un cuerpo o la dilatación del intervalo de tiempo entre dos acontecimientos son hechos reales y objetivos, libres del espejismo del observador. El movimiento uniforme ni afecta a la marcha de los relojes ni engendra tensiones de acortamiento en los cuerpos; lo contrario sería incoherente con el principio de la Relatividad. La dilatación temporal es la variación de las medidas del tiempo debidas a la intromisión de variaciones de las coordenadas espaciales originadas, a su vez, por el movimiento del observador. Hoy se trabaja con partículas cuya vida es del orden de 10^{-9} seg., dotadas con velocidades próximas a las de la luz, gracias a que el reloj hipotético ligado a tales partículas, marcha miles de veces más despacio que el reloj del observador terrestre. La relatividad respecto al espacio ya era admitida en algunos fenómenos del pensamiento clásico. Las expresiones “arriba absoluto” y “abajo absoluto” desaparecieron al descubrirse la redondez de la Tierra. Pero que el intervalo de tiempo entre dos acontecimientos dependiese del sistema de referencia, era una propiedad extraña en la Física clásica que destruía la unidad del tiempo y la ordenación temporal de los sucesos.

La constancia de la velocidad de la luz, respecto de un sistema inercial, elevó a esta magnitud a la categoría de constante universal. Pero una velocidad es una relación entre una longitud y un tiempo, y la existencia de una velocidad universal es, pues, la existencia de un vínculo universal entre las magnitudes del espacio y del tiempo. Esto significa que la distinción entre el espacio en sí y el tiempo en sí, entre relaciones espaciales y relaciones temporales, consideradas aisladamente, carecen de significación absoluta y sólo tienen sentido con relación a tal o cual sistema de referencia. El hecho de que en el proceso de medida el espacio y el tiempo aparecieran inseparablemente unidos, llevaron a Minkowski a atribuir a cada acontecimiento un punto en una variedad tetradimensional, llamada espacio-tiempo, cuya estructura o geometría viene caracterizada por el grupo de transformaciones de Lorentz. Grupo que deja invariante las propiedades físicas y geométricas del espacio de los acontecimientos. Así, la distancia entre dos acontecimientos, por ser una invariante al grupo de Lorentz, es independiente del sistema de referencia, es decir, es una magnitud absoluta.

La relatividad, como vemos, no liquida los conceptos absolutos; al revés, toma como razón de su existencia aquellas magnitudes cuyo valor es igual para todos los observadores, con independencia de sus circunstancias, esto es, descubre entidades con

existencia propia, situadas “más allá” de nuestros sentidos como el espacio-tiempo.

Otro contraste con el pensamiento clásico surge al imponer los límites de aplicabilidad al grupo de Lorentz. Tales límites excluyen la posibilidad de sistemas inerciales con velocidades mayores que la de la luz, pues para velocidades iguales a la de luz tanto las coordenadas espacio-temporales como sus variables conjugadas se hacen impropias y para velocidades mayores que la de la luz se hacen imaginarias. Resultado que despoja a los cuerpos que caminan con velocidad mayor que la de la luz de atributos observables.

RELATIVIDAD GENERAL.

La evolución del pensamiento relativista fue reflejando a lo largo de su desarrollo que el contenido de la Relatividad consistía, no tanto en el rechazo del tiempo absoluto, como en el establecimiento de un vínculo universal entre el espacio y el tiempo, en virtud del cual surge una entidad con existencia propia: el espacio-tiempo. Por otra parte, el principio de la relatividad extendía la equivalencia a todos los sistemas inerciales; pero era incapaz de dar respuesta a la pregunta de Mach: ¿Qué ocurría con los sistemas no inerciales?. Quedaba, aún, la posibilidad de una aceleración absoluta.

Einstein (1915), ante la imposibilidad de distinguir, mediante experimentos de laboratorio, los efectos de la aceleración producidos por un campo gravitatorio de los originados por un sistema no-inercial, establece la equivalencia entre sistemas no-inerciales y campos gravitatorios ligados a sistemas inerciales. Existiendo siempre la posibilidad para regiones suficientemente pequeñas del espacio-tiempo, de anularse el campo gravitatorio mediante la elección adecuada de un sistema inercial. La posibilidad de tal elección constituye, por lo tanto, el principio de equivalencia entre sistemas inerciales y no-inerciales. La respuesta a la pregunta de Mach es tajante: no existen sistemas de referencia privilegiados. El viejo pleito entre Ptolomeo y Copérnico no tiene razón de ser: sus sistemas de referencia son equivalentes a la luz de la Relatividad General.

La sustitución de las fuerzas de inercia por campos gravitatorios implica una interconexión entre ambos fenómenos. Más, según Newton, las fuerzas de inercia tenían su origen en una propiedad del espacio, los campos gravitatorios en una propiedad de la materia. Einstein deduce la interconexión espacio-materia basándose en que el elemento métrico diferencial de Riemann del espacio-tiempo, correspondiente a un sistema inercial, es una forma pseudoeuclídea:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - dx_1^2 - dx_2^2 - dx_3^2 ;$$

mientras que para los sistemas inerciales, bajo la acción de un campo gravitatorio, es la forma bilineal

$$ds^2 = g_{ij} dx_i dx_j ,$$

correspondiente a los espacios curvos. Luego, el efecto del campo gravitatorio, señala Einstein, es un cambio de métrica en los puntos del espacio-tiempo, en correspondencia con el cual las funciones campo pasan a ser los coeficientes g_{ij} del elemento métrico diferencial de Riemann. Esto significa que las propiedades geométricas del espacio-tiempo dependen, tan sólo, de la distribución y movimientos de la materia y no de las propiedades invariantes del espacio y del tiempo. La materia, por su sola presencia, interviene en la estructura del espacio y en el transcurrir del tiempo: allí donde existe materia los relojes se retrasan y la suma de los ángulos de un triángulo valen más de 180° .

De forma tan elegante, Einstein, bajo la síntesis del pensamiento geométrico de Riemann, formula y estructura la interconexión espacio-materia: dónde el efecto gravitatorio se presenta con cualidades de carácter métrico y dónde las propiedades de la geometría intrínseca, contempladas en los espacios abstractos de las geometrías no-euclídeas, se descubren en la teoría de la gravitación como hechos contingentes. Así, un cambio de métrica en un punto del espacio-tiempo implica un cambio de curvatura y las geodésicas de las variedades espacio-tiempo pasan a ser las trayectorias de los cuerpos que se mueven por inercia.

ECUACIONES DE EINSTEIN (6).

Einstein, bajo el principio de covariancia universal, generaliza la teoría del potencial gravitatorio de Newton obteniendo como ecuaciones del campo gravitatorio:

$$R_{ij} - \frac{1}{2}Rg_{ij} = \frac{8K}{c^2} T_{ij} \quad i, j \in \{1,2,3,4\},$$

donde R_{ij} es el tensor de Ricci, R la curvatura de Riemann, g_{ij} el tensor métrico fundamental, K la constante de gravitación, c la velocidad de la luz y T_{ij} el tensor energía-impulso.

Estas ecuaciones relacionan de forma muy simple las magnitudes que caracterizan la curvatura del espacio-tiempo con las que caracterizan la distribución y movimientos de la materia: en aquellas regiones donde se encuentra localizada la materia, el espacio-tiempo toma forma y ocupa direcciones privilegiadas, es decir, surge la llamada curvatura de Riemann. En esta concepción, el campo aparece como una realidad primera, creando, modelando y dando contenido físico al espacio.

Después de 25 siglos de "saber científico", volvemos a decir, como los filósofos de Mileto: el Universo está constituido por una sustancia única: el espacio-tiempo, susceptible de tomar locamente formas particulares en los puntos donde se encuentra, lo que en lenguaje vulgar llamamos materia. La diferencia está en que para los griegos "la sustancia única" era un principio unificador para explicar la naturaleza de las cosas, en cambio para el hombre del siglo XX es el

descubrimiento de una realidad situada más allá de nuestros sentidos.

Desde la línea puramente filosófica es digno de mención el trabajo de Ugemov: ¿Puede estar el continuo espacio-tiempo en acción recíproca con la materia?. Siguiendo muy de cerca el heliomorfismo aristotélico, Ugemov aplica al espacio-tiempo y a la materia las categorías de forma y contenido, y muestra que la interacción entre ambos es una relación de tipo forma-contenido. Lo que Aristóteles aplica a cada cosa en particular, Ugemov lo traslada al todo en general, con lo cual el todo aparece como una sustancia única (7).

PRINCIPIO DE MACH.

La solución general de las ecuaciones de Einstein no se conoce, por lo que es necesario buscar soluciones particulares. En los puntos donde no existe materia, el tensor energía-impulso es nulo, $T_{ij}=0$ y las ecuaciones de Einstein se reducen a igualar a cero todas las componentes del tensor de Ricci: $R_{ij}=0$. Pero tales ecuaciones incluyen el espacio-tiempo de la Teoría Restringida y el espacio de curvatura no nula. Más, tanto en un caso como en el otro, en tales puntos existe una métrica definida por las funciones campo g_{ij} . El origen de estas funciones en los puntos libres de materia, fue evitado por Newton al interpretar los movimientos en los que intervienen fuerzas de inercia, como movimientos acelerados con respecto al espacio absoluto. Recuérdesse el experimento del “cubo de agua” para demostrar “la rotación absoluta”. De él, deduce Newton: los movimientos relativos acelerados respecto de la masas terrestres no generan fuerza de inercia. Los movimientos acelerados respecto al espacio absoluto sí. Mach, hace observar que la interpretación de Newton es correcta si se admite que las estrellas fijas están en reposo en el espacio. Puesto que no podemos tener ningún conocimiento de que tal cosa ocurra, el concepto de rotación absoluta carece de fundamento.

Einstein intenta modelar la idea de Mach. Tomando como principio que efectos observables implican causas observables, admite que el Universo de estrellas fijas induce sobre los cuerpos fuerzas de inercia siempre que se mueven respecto del universo de estrellas fijas con movimientos acelerados y añade que el campo que induce estas fuerzas es el campo gravitatorio de las masas cósmicas. Con esto, el principio de Mach puede enunciarse así: las funciones campo g_{ij} del espacio locamente libre de materia, vienen determinadas por las acciones gravitatorias de la distribución de las masas cósmicas.

Existen indicios de que la teoría de Einstein podría dar como resultado el Principio de Mach. Uno puede ser que la masa inerte de un cuerpo aumenta en el campo gravitatorio, de manera directamente proporcional al potencial de éste. Otro, que una esfera hueca, en rotación, incrementa las fuerzas centrífugas en un cuerpo que, situado en su centro, gira en sentido contrario. Sin embargo, la contribución más importante a las fuerzas de inercia, en ambos casos, se deben a

las funciones campo g_{ij} correspondiente a la métrica de la Teoría Restringida, que son introducidas como condiciones de contorno en los puntos del infinito. Por otra parte, los valores de las funciones campo en el contorno deberían deducirse directamente de la distribución de masas cósmicas, y no darse a priori (8).

De todo esto resulta que la teoría de la gravitación de Einstein, en su estado actual, es incapaz de dar como resultado demostrable el Principio de Mach. Es posible que para ello sea necesario modificar las ecuaciones de Einstein o incluso introducir un campo cósmico. Pero, con independencia de toda modificación, es decisivo, tanto para la fundamentación de la Geometría Abstracta, como para la consistencia de la Relatividad, la circunstancia de que las funciones campo g_{ij} , del espacio locamente libre de materia, se han debido a efectos producidos por hechos contingentes y no estén dados, solamente, como resultados de los métodos de medición de longitudes y tiempos, es decir, a priori.

SOLUCION DE SCHWARZCHILD (9).

Pocos meses después de la publicación de la Relatividad Generalizada por Einstein, el astrónomo alemán Karl Schwarzschild, da la primera solución a las ecuaciones de Einstein, para una distribución de materia con simetría esférica. El resultado es el elemento métrico diferencial:

$$ds^2 = \frac{dr^2}{1 - r_0/r} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\phi^2 - (1 - r_0/r) c^2 dt^2$$

Donde $r_0 = (2K\mathfrak{M})/c^2$ siendo K la constante de gravitación, $\mathfrak{M}$ la masa de distribución de la materia y c la velocidad de la luz.

Las geodésicas del espacio de Schwarzschild difieren poco, en su forma, de las órbitas planetarias de la gravitación de Newton, presentando como novedad el llamado avance del perihelio. Este fenómeno había sido descubierto por los astrónomos de la mitad del siglo XIX en la órbita de Mercurio. Los cálculos correspondientes a la solución de Schwarzschild dieron un avance del perihelio en el más completo acuerdo con las observaciones astronómicas. Cronológicamente, el avance del perihelio de Mercurio era el primer fenómeno de la Mecánica Celeste que la teoría de la gravitación de Newton era incapaz de explicar. La solución de Schwarzschild era válida, también, para el rayo de luz en un campo gravitatorio, con sólo igualar a cero el elemento métrico-diferencial de Reimann. La luz de una estrella experimentaba una deflexión al pasar junto al Sol. El valor teórico superaba en el 20% del hallado experimentalmente, por primera vez, en la famosa expedición de 1917.

Otro efecto del campo gravitatorio sobre el rayo de luz, contenido en la solución de Schwarzschild, es "el desplazamiento hacia el rojo de las líneas espectrales". Este efecto fue comprobado por Adams en 1925.

Al analizar la métrica en los puntos de la esfera de Schwarzschild, esto es para $r=r_0$, nos encontramos que el coeficiente de dr^2 se hace infinito, mientras que el de dt^2 se anula. En principio, este resultado se interpreta como la existencia de una singularidad en el espacio-tiempo, lo que equivaldría a admitir que todos los cuerpos de la Naturaleza tenían un radio real mayor que su radio de Schwarzschild. En 1958 Finkelstein, por medio de un cambio de coordenadas, muestra que se trata de una singularidad aparente. Que cuando el radio del cuerpo es menor que el radio de Schwarzschild, se puede construir únicamente un sistema de referencia mediante cuerpos en movimiento central convergente. Se trata de una situación verdaderamente curiosa: desde los puntos interiores a la esfera de Schwarzschild no es posible transmitir información hacia el exterior. Sin embargo, cuando r tiende a cero la singularidad se hace real.

La esfera de Schwarzschild establece una partición en el espacio-tiempo: la geometría solamente es estática para el espacio-tiempo exterior a la esfera de Schwarzschild, en el interior los campos espaciales y temporales se intercambian.

Laplace, había señalado la posibilidad de existencia de estrellas con masas tales que su velocidad de escape supere la velocidad de la luz. Oppenheimer y Snyder (1936), propusieron el primer modelo matemático de colapso estelar, con simetría esférica, que conducía a lo que Wheeler denominó un agujero negro. Kerr y Newman (1965) hallaron una solución, más general que la de Schwarzschild, para el colapso de estrellas en rotación alrededor de un eje o con carga eléctrica (10) (11) (12).

Para colapsos estelares con pequeñas desviaciones respecto a la simetría esférica, Penrose, Hawking y otros demuestran la existencia de singularidades. Price y Hartle, comprueban la estabilidad del horizonte de sucesos para pequeñas perturbaciones. Israel y Carter, muestran la unicidad de la geometría de Kerr-Newman en el espacio-tiempo exterior al horizonte de sucesos. De manera general, Penrose demuestra que la existencia de una superficie atrapada es condición suficiente para la existencia de una singularidad. Sin embargo, Penrose no logra demostrar que tal condición es necesaria. La posibilidad de singularidades desnudas, esto es sin horizonte de sucesos, queda abierta: modelos matemáticos de colapso tipo "tarta" o "cigarro" conducen a singularidades desnudas (13) (14) (15).

Para liberar al Universo de las implicaciones asociadas a las singularidades desnudas, Penrose introduce la hipótesis de censura cósmica. Nadie ha puesto en duda los teoremas de existencia de singularidades, pues ellos son consecuencia de la geometría del espacio-tiempo decretada por la Relatividad General.

Sin embargo, cuando la curvatura del espacio-tiempo toma valores muy elevados, los efectos de la gravitación cuántica se hacen sentir y la teoría de Einstein deja de ser una traducción exacta de la realidad. Mas, en la gravitación cuántica, un agujero negro, en virtud del principio de incertidumbre, debe irradiar materia y energía de acuerdo con su temperatura; con lo cual su masa irá disminuyendo hasta extinguirse y con él su singularidad. En otras palabras: bajo la

visión cuántica el agujero negro no es tan negro (como dice Hawking), ni la hipótesis de censura cósmica tan necesaria (16) (17).

Se dice que no existen observaciones definitivas de la existencia de agujeros negros. Sobre esto se puede argumentar: un agujero negro es una estructura de distribución de materia y energía que puede darse, tanto en las estrellas de neutrones, como en los quásars o en el centro de una galaxia. Hoy, la Astrofísica, dispone de instrumentos suficientes para detectar tales sistemas; no así de mecanismos físicos capaces de decirnos si estos sistemas tienen o no estructuras de agujero negro. De la misma manera que la actual Astrofísica tiene medios para observar una estrella y hasta algunos de sus planetas, pero no tiene capacidad para comprobar su estructura de sistema solar. Además, el teorema de Penrose, de naturaleza topológica, asegura la existencia de un agujero negro o una singularidad desnuda en aquellas regiones donde la gravedad sea capaz de crear una superficie atrapada. Del mismo modo que la ley de Newton asegura la estructura del sistema solar entre la estrella y sus planetas.

TEORIAS UNITARIAS.

Einstein, durante 30 años, intenta desarrollar una teoría no lineal de la Relatividad, con el fin de establecer la síntesis geométrica de la gravedad y del electromagnetismo. Creía que los efectos no-lineales tendrían acción a pequeñas distancias donde aparecerían los efectos cuánticos; pues estaba convencido que cuantificar una teoría de campos para convertirla en una teoría estadística era sólo una tentativa para describir linealmente relaciones esencialmente no-lineales. Tal vez, el escaso desarrollo y la complejidad de las teorías no-lineales le impidieron la construcción de una teoría operativa.

Hermann Weyl (1918) intenta la unificación de la gravedad y del electromagnetismo a partir del principio de invariancia al contraste, esto es, la descripción de una fuerza es invariable al cambio de escalas de longitud y tiempo que se asocian como instrumentos de medida en los puntos del espacio-tiempo. La teoría de Weyl no fue capaz de dar una descripción correcta de la gravedad. Ello no impidió que el principio de invariancia al contraste, aforo o gauge, se convirtiera en el eje de las teorías sobre partículas elementales.

Kaluza (1921) en su artículo "Sobre el problema de unificación en la Física", toma como punto de partida la Relatividad General, añade una quinta dimensión al espacio-tiempo y prueba que la gravedad y el electromagnetismo podrían emerger de esta versión pentadimensional de la Relatividad Generalizada. En su versión original, Kaluza, no aclara si esta quinta dimensión es físicamente real o se trata de un puro artificio matemático para lograr la unificación (18).

O. Klein (1921) demuestra, por medio de la ecuación de Schrödinger la

compatibilidad de la Mecánica Cuántica y la teoría pentagonal de Kaluza (19). Esto permite dar una posible realidad física a la quinta dimensión; suponiendo que ésta se enrolla sobre un círculo de radio muy pequeño y asocia a cada punto del espacio-tiempo un círculo de tales características. Klein, mediante razonamiento cuántico, llega a que el radio de la circunferencia correspondiente al círculo de la quinta dimensión, es del orden de 10^{-30} centímetros. Para detectar estructuras de este orden con las técnicas actuales, serían necesarios aceleradores de una longitud de varios años luz. Este dato es una comprobación más de la enorme diferencia entre las intensidades de las fuerzas electromagnéticas y gravitatorias a escala nuclear. Mas una teoría unitaria, también debe dar cuenta de las otras fuerzas nucleares.

TEORIA CUANTICA DE LOS CAMPOS.

Weinberg señala como los grandes logros del pensamiento físico del siglo XX: el desarrollo de la teoría cuántica de los campos y el reconocimiento del papel crucial desempeñado por los principios de simetría. Las teorías cuánticas concilian de modo muy elegante lo continuo y lo discreto, o lo que es lo mismo, la física del campo y la física del punto. Ellas asocian al corpúsculo, mediante funciones de onda, magnitud de campo, que en el proceso de medida conservan su naturaleza de magnitudes ligadas a una entidad discreta, al mismo tiempo que establecen la continuidad, por ser las funciones de onda funciones continuas de las coordenadas espacio-temporales.

La teoría cuántica de los campos surgió de forma natural de la unión de la Mecánica Cuántica y de la Teoría Especial de la Relatividad. La existencia de una velocidad finita en la propagación de acciones a distancia decretada por la Relatividad conduce a la idea de campo. La exigencia cuántica de que la energía y el momento se transmiten en porciones discretas o cuantos, conduce al concepto de partícula virtual. La interacción queda reducida a dos procesos locales: emisión y absorción de la partícula virtual. La aparente violación de los principios de conservación de la energía y del momento, en el intercambio de partículas virtuales, está regulada por el principio de incertidumbre. Principio que permite esta violación durante un tiempo, tal que el producto de la energía correspondiente a la violación por ese tiempo no supere la constante de Planck. Se define como masa de una partícula virtual el equivalente energético intercambiado en la interacción. De aquí, que las interacciones realizadas por partículas virtuales de grandes masas tengan alcance corto y las realizadas por partículas de masas pequeñas tengan largo alcance; si la masa es nula su alcance es infinito.

La unificación completa de la Relatividad Especial y la Mecánica Cuántica fue desarrollada por Dirac, Heisenberg y Pauli a finales de los años veinte. Dirac(1928), al formular la ecuación de Schrödinger para un electrón en términos relativistas,

observa que la consistencia de tal ecuación implica la existencia de otra partícula de la misma masa del electrón, pero de carga opuesta (20). En 1932 Anderson, descubre en la radiación cósmica el positrón. Hoy se admite que toda partícula natural tiene su antipartícula. La exigencia de este apareamiento simétrico es ya un principio general de la Teoría Cuántica de los campos. Esto es independiente de que, en el estado actual del Universo, la materia domine sobre la antimateria. Este hecho parece ser debido a que las condiciones reinantes a los 10^{-35} segundos, después de la “gran explosión”, condujeron a tal asimetría y una vez establecida, ésta quedó congelada.

La introducción de los conceptos relativistas en el pensamiento cuántico indujeron a la creación de nuevos conceptos y a la predicción de nuevos fenómenos. Entre los primeros, señalamos el *spín* o momento angular intrínseco, como propiedad general de las partículas. Pudiendo tomar valores enteros o semienteros de la constante de Plank. Como propiedades de conjunto: las partículas de *spín* semientero (fermiones) son de materia y dos fermiones no pueden tener el mismo estado cuántico. Las partículas de *spín* entero (bosones) son de radiación y se agrupan en estado de energía mínima. Entre los fenómenos, señalaremos los de aniquilación materia-antimateria y el fenómeno inverso: la creación de partículas materiales a partir de un estado de energía pura.

El formalismo de la teoría cuántica de los campos como extensión natural del formalismo clásico de los campos es aplicable a las cuatro fuerzas de la naturaleza. Las dificultades en la aplicación práctica, surgen porque en el cálculo de probabilidades de sucesos o reacciones aparecen cantidades infinitas. La eliminación de estas cantidades infinitas ha constituido el caballo de batalla de la Física de los últimos decenios. El método empleado se conoce con el nombre de renormalización. En esencia, este método opera buscando un infinito negativo por cada infinito positivo, de manera que la suma de todas las contribuciones posibles de infinitos se cancelan. Schwinger demostró que podía obtenerse un residuo finito por este método. Residuo que, por otra parte, es la predicción de la teoría (21).

"Ciertos elementos de simetría pueden coexistir en ciertos fenómenos, pero no son necesarios. Lo que es necesario es que ciertos elementos de simetría no existan. Es la disimetría la que crea el fenómeno"
Pierre Curie (22).

LOS PRINCIPIOS DE SIMETRÍA.

En el estado actual del conocimiento físico un principio de simetría es equivalente a un principio de invariancia y conduce a una ley de conservación. Las leyes de conservación fueron estudiadas y extendidas en toda su amplitud por la física clásica; pero su íntima relación con las leyes de simetría no fue descubierta hasta principios del siglo XX. En la mecánica clásica, las simetrías continuas espacio-temporales conectan, de forma natural, con sus leyes de conservación: energía, momento lineal y momento angular. Sin embargo, la simetría lineal izquierda- derecha, por ser de naturaleza discreta, servía para simplificar muchos problemas; pero su ley de conservación no fue descubierta hasta que fue introducida la Mecánica Cuántica, donde la diferencia entre simetría continua y discreta desaparecen, conduciendo a la ley de conservación de la paridad. Otro tanto ocurrió con la inversión temporal. Frente a estas simetrías externas asociadas a las magnitudes espacio-temporales, los físicos han ido descubriendo las llamadas simetrías internas asociadas a las propiedades internas de las partículas: carga, isospín.....

La idea de simbolizar las simetrías geométricas por un grupo de transformaciones, dió paso, en el pensamiento físico, a la elaboración de teorías cuyas leyes físicas fuesen invariantes a un determinado grupo de transformaciones. De esta manera, unas teorías se edificaban bajo un principio de simetría global; esto es, bajo la existencia de una transformación que se aplicaba uniformemente a todos los puntos del espacio-tiempo. Otras teorías se construían bajo un principio de simetría local, que implicaba la invariancia de las leyes físicas, aún cuando tenga lugar una transformación distinta en cada punto del espacio-tiempo.

Es evidente que una simetría local impone exigencias más fuertes en las teorías que una simetría global y descubre uniones más profundas en la Naturaleza. La existencia de una simetría local implica la existencia de un conjunto de funciones espacio-temporales capaces de compensar los cambios originados en las leyes físicas cuando se pasa de un punto a otro del espacio-tiempo. Estos conjuntos de funciones han sido llamados campos de contraste, aforo o gauge.

En este contexto, la Relatividad Especial se edifica sobre un principio de simetría global: el principio de Poincaré. Pues el grupo de Lorentz es el mismo en todos los puntos del espacio-tiempo. La exigencia de que la simetría de Poincaré fuese una simetría local o de contraste, implica la invariancia de las leyes físicas, aunque el grupo de transformaciones fuese distinto en cada punto del espacio-tiempo. Esto es equivalente a establecer la invariancia de las leyes física respecto de los sistemas no-inerciales. Einstein, para construir tal equivalencia, tuvo que introducir el campo gravitatorio: el resultado fue la Teoría General de la Relatividad. En síntesis, la simetría de contraste de Poincaré, no es una simetría de un campo distribuido en el espacio-tiempo, sino que es la simetría de la estructura del espacio-tiempo. El campo gravitatorio es el campo de contraste de la simetría local de Poincaré y la fuerza de la gravedad es la exigencia de que la simetría de Poincaré sea local.

Dentro del pensamiento clásico, la teoría electromagnética de Maxwell es el resultado de transformar una simetría global en una simetría local. Aquí la simetría local puede ser la invariancia del campo eléctrico a una misma variación del potencial eléctrico en todos los puntos del espacio, en un mismo instante. Tal invariancia sólo es posible si se trata de una distribución estática de cargas eléctricas. La exigencia de la invariancia del campo eléctrico a estos cambios arbitrarios del potencial, en el caso de cargas en movimiento implica la existencia de un campo magnético. De tal forma, que el cambio del potencial eléctrico venga compensado por los cambios del potencial magnético. El campo magnético es, pues, un campo de contraste y el magnetismo surge como condición para que la simetría global de invariancia del campo eléctrico a los cambios de potencial sea una simetría local.

El hecho de que dos de las fuerzas fundamentales de la naturaleza, teóricamente, fuesen el resultado de transformar una simetría global en local, ha inducido a buscar el origen de las fuerzas nucleares en la transición de una simetría. Yang y Mills (1954) a partir de la invariancia de las interacciones fuertes al intercambio de protones por neutrones, consideraron la simetría global de invariancia de las interacciones fuertes a las rotaciones de spín isotópico y establecieron, mediante la introducción de tres campos vectoriales, la simetría local. Durante diez años, la teoría de contraste no abeliana de Yang-Mills fue una pura curiosidad matemática, pues conducía a fuerzas y partículas inexistentes. Dos descubrimientos teóricos convirtieron el principio de invariancia local con respecto al spín isotópico en la piedra angular de las teorías sobre partículas elementales. Uno fué la demostración de Higgs, según la cual, el efecto de ruptura espontánea de una simetría, en las teorías de campos de contraste, es dar masa a algunos bosones, mientras otros permanecen sin masa. El otro fue la demostración de Hooff en virtud de la cual las teorías de contraste no abelianas son renormalizables (23) (24) (25).

Aunque la teoría de Yang-Mills había sido formulada para explicar las interacciones fuertes, consiguen su renormalización en la teoría electrodébil.

Teoría que unifica las interacciones débiles y electromagnéticas bajo el postulado de invariancia local con respecto al spín isotópico, mediante la introducción de cuatro campos vectoriales. La predicción de las corrientes débiles neutras y el descubrimiento de los bosones vectoriales W^+ , W^- y Z^0 , por el CERN en 1983 fueron su confirmación experimental. El éxito de la teoría electrodébil llevó a los físicos a proponer otra teoría de contraste no-abeliana para explicar la interacción fuerte: la cromodinámica cuántica. En ella se introduce la carga de color para explicar las interacciones entre los quarks. A los quarks se les asignan los matices rojo, verde y azul. A los anti-quarks los colores complementarios. Los colores de los quarks se pueden representar por la orientación de un vector en un espacio interno imaginario (26) (27).

Con lo cual el cambio de dirección o rotación del vector se traducirá en un cambio de color del quark, la simetría de color exige que todos los hadrones tomen el color blanco, esto es, que las propiedades observables de los hadrones sean invariantes a los cambios de color de los quarks que los constituyen. En la simetría global, para mantener esta condición, los vectores de color de un hadrón deben girar en bloque en todos los puntos del espacio-tiempo. En la simetría local la variación libre de color de los quarks de un punto a otro, implica la existencia de ocho campos de contraste capaces de restablecer dicha invariancia. La interacción fuerte, en este contexto, no es más que el sistema de interacciones necesarias para que las propiedades observables de los hadrones sean invariantes a los cambios de color de los quarks.

La idea de elaborar una teoría unificada de las fuerzas fuertes, débiles y electromagnéticas, mediante una teoría de contraste no-abeliana, basada en una simetría mayor, que tenga como subgrupos la simetría de spín isotópico y de color, ha tenido varias soluciones. Tales teorías se llaman de la gran unificación.

SUPERSIMETRIA.

Durante muchos años se creyó que era imposible establecer una simetría entre fermiones y bosones, tal vez, por disparidad entre ambas partículas: unos eran los constituyentes de la materia, los otros de la radiación y como conjuntos obedecían a estadísticas disjuntas. La idea de construir esquemas de simetría capaces de relacionar partículas de spines diferentes surgió a principios de los años sesenta con la primera versión de la supersimetría. La supersimetría relaciona partículas con spines contiguos, esto es, partículas de spín J con partículas de spín $J+1/2$ ó $J-1/2$. Esto implica que un fermión y un bosón de spines contiguos puedan ser considerados como manifestaciones alternativas de una misma partícula, y que este bosón y este fermión puedan representarse en un espacio interno imaginario por vectores antiparalelos. Dentro de este esquema de representación, la supersimetría global y local se definen de forma

análoga a la simetría del espín isotópico.

La supersimetría, así concebida, es una simetría interna; pues tiene su origen en las propiedades intrínsecas de las partículas y no en las posiciones de estas en el espacio-tiempo. Sin embargo, el hecho de que el producto de dos rotaciones supersimétricas sea un desplazamiento en el espacio-tiempo, esto es, una transformación de Poincaré, implica que uno de los campos de contraste, necesario para establecer la invariancia local supersimétrica, sea el campo gravitatorio de Einstein, resultado que permite denominar al principio de supersimetría local con el nombre de supergravedad. Las teorías basadas en este principio relacionan, de forma muy simple, las cuatro fuerzas de la Naturaleza a través de las simetrías subyacentes entre la estructura del espacio-tiempo, la materia y la radiación, aparte de resolver los problemas de consistencia interna que entrañan las teorías de la gran unificación.

La elaboración de una teoría supergravitatoria exige la introducción de nuevos campos de contraste, llamados campos de gravitino de espín $3/2$. Estos campos son los compañeros supersimétricos del cuanto que transporta la fuerza de la gravedad o gravitón de espín 2. De esta forma, surgieron las llamadas teorías generalizadas de la supergravedad, que en número de ocho representan los distintos intentos de conseguir la teoría unificada de las fuerzas de la Naturaleza. Todos toman como campo de contraste el del gravitón al que añaden un número de campos del gravitino de espín $3/2$ comprendido entre uno y ocho. En ellas, las partículas de espín contiguo están relacionadas por transformaciones supersimétricas y las de igual espín por medio de transformaciones de simetría interna, de tal forma, que el conjunto de todas las partículas elementales queda unificado.

La supergravedad trata, esencialmente, dos problemas: la unificación de las fuerzas de la Naturaleza y la eliminación de los infinitos de la gravitación cuántica. En el problema de unificación, las teorías supergravitatorias generalizadas conducen a un grado de unificación de fuerzas y partículas mayor que cualquier teoría cuántica de los campos. Además, debido al escaso número de parámetros libres o ajustables que intervienen en su formulación, sus predicciones alcanzan gran claridad y precisión. Sin embargo, no existe concordancia entre las partículas naturales y las que dichas teorías predicen. Y en cuanto a la cancelación de infinitos de la gravedad, sólo se ha logrado para diagramas de uno o dos ciclos. Todo intento de ampliación ha sido un fracaso. Ello no excluye la posibilidad, por una parte, de encontrar nuevos métodos de renormalización capaces de cancelar los infinitos. Por otra parte, que siendo la supergravedad una simetría rota, se consiga mediante el mecanismo de Higgs la identificación entre partículas. Lo que exigiría, en primer lugar, el conocimiento exacto de las partículas naturales, cuestión actualmente en crisis (28).

LA SUPERGRAVEDAD EN LA TEORIA DE KALUZA-KLEIN.

Hasta aquí hemos presentado la supergravedad como un intento de describir la teoría general de la gravitación en términos cuánticos. Mas en la teoría de

Einstein, las fuerzas derivan de las propiedades geométricas del espacio-tiempo. Ultimamente se ha demostrado la posibilidad de describir la supergravedad en términos geométricos en un espacio-tiempo del tipo Kaluza-Klein. El número mínimo de dimensiones de este espacio-tiempo para englobar las cuatros fuerzas de la Naturaleza es once: cuatro que corresponden al espacio-tiempo ordinario y siete que permanecen ocultas. Si el número de dimensiones es mayor que once, la teoría supergravitatoria correspondiente carece de sentido y si es menor de once, existen varias versiones, sólo para once dimensiones la teoría es única. Un gran número de soluciones de las ecuaciones de la supergravedad correspondiente a once dimensiones conducen a espacios de Kaluza-Klein, constituidos por el espacio-tiempo ordinario y por una superficie cerrada de compactación o arrollamiento de las otras siete dimensiones. La geometría y los distintos grupos de simetría de estas superficies, determinan los campos de contraste no-abelianos que deben unirse al gravitatorio. Las estructuras de las ondas estacionarias permitidas por la superficies de compactación fijan las masas y las propiedades de las partículas elementales en el espacio-tiempo ordinario. Dos han sido los tipos de superficies de compactación más estudiadas: el análogo heptadimensional de la esfera y el conjunto de superficies con simetría necesarias para dar cabida a las interacciones fuertes, débiles y electromagnéticas. Sin embargo, de todas las estructuras de once dimensiones tratadas hasta la fecha, ninguna ha sido capaz de dar soluciones a los llamados problemas de quiralidad, cosmológico y de renormalización. Tal vez, estos problemas requieren un estudio más profundo, pues parece ser que la resolución del tercero, llevaría a la solución de los otros dos.

El límite de la actual teoría cuántica de los campos de contraste se encuentra a distancias del orden de los 10^{-35} m y los 10^{-44} segundos. A tales distancias las fluctuaciones de energía, debidas al principio de Heisemberg, pueden manifestarse en partículas virtuales y materializarse a partir del vacío, en el corto intervalo de tiempo permitido por el principio de incertidumbre. Las fluctuaciones de energía, a estas distancias, adquieren tal magnitud que la acumulación de masa de las partículas virtuales, son tales que originan agujeros negros virtuales. El espacio-tiempo a esta escala está muy curvado y en cierto sentido lleno de agujeros. En los cálculos de renormalización se supone un espacio-tiempo continuo y de curvatura casi nula: los resultados debidos a tal desviación conducen a infinitos no cancelables(29).

LA TEORIA DE LAS SUPERCUERDAS.

Su origen se encuentra en el modelo de las resonancias duales que, a finales de los años sesenta, intentaba explicar las interacciones fuertes. Veneziano dió una fórmula, ajena a la teoría cuántica de los campos, que explicaba muchas de las propiedades de la interacción fuerte. Nambu y otros, demostraron que la fórmula

de Veneziano equivale a describir los hadrones como cuerdas: los armónicos de estas cuerdas corresponden con los hadrones observados. A la cuerda de Veneziano, que sólo contenía los grados de libertad bosónicos, se le incorporaron los grados de libertad fermiónicos, mediante la supersimetría del espacio-tiempo.

Se admite la existencia de dos clases de cuerdas: las abiertas y las cerradas. Las abiertas están relacionadas con los campos de Yang-Mills y sus estados de vibración dan partículas de masa nula y $\text{spín } 1$. Las cerradas están relacionadas con el campo gravitatorio y sus estados de vibración son partículas de masa nula y $\text{spín } 2$. La interacción entre cuerdas se realiza mediante los procesos de unión y división: una cuerda puede dividirse en dos o dos cuerdas abiertas pueden unir sus extremos y dar lugar a una cuerda cerrada. Ello implica que cualquier teoría de cuerdas abiertas debe contener cuerdas cerradas o viceversa. En otros términos: toda teoría de fuerzas de Yang-Mills, para mantener su coherencia, debe contener la fuerza de gravedad y recíprocamente.

Las fuerzas de la Naturaleza, quedan así unificadas por la coherencia interna de la teoría. Este proceso de interacción se completa añadiendo una propiedad intrínseca de las cuerdas, análoga a la propiedad del imán roto: al dividir una cuerdas en dos, cada parte sigue siendo una cuerda. La idea de átomo como unidad indivisible, que venía formando parte de nuestra cultura, debe ser sustituida por otra concepción distinta: "el todo es igual a la parte".

La formulación de una teoría de supercuerdas sin contradicción interna exige un espacio-tiempo de diez dimensiones, seis de las cuales debe compactarse en una superficie de dimensiones inobservables. El movimiento de una cuerda en este espacio-tiempo de diez dimensiones, está regido clásicamente por el principio de acción mínima, según el cual, la cuerda barre en su movimiento una superficie bidimensional de área mínima. Al igual que en la teoría de la gravitación de Einstein, la cuerda interacciona con el espacio-tiempo en el cual se mueve. El tratamiento cuántico describe, de forma muy simple, esta interacción, al mismo tiempo que, a partir de la curvatura de la superficie de compactación, establece los espacios capaces de explicar la física de las cuatro dimensiones observables. Para distancias en las que aparecen las fluctuaciones cuánticas del espacio-tiempo, las predicciones de la teoría de las supercuerdas, en la actualidad, sólo tienen un valor especulativo. Entre ellas, señalamos la que establece la igualdad entre la longitud de la cuerda, 10^{-35}m , y la dimensión de la superficie de compactación, o las que relacionan la curvatura de la superficie de compactación con las roturas de las simetrías de la Naturaleza.

Por último, diremos que la teoría completa de las supercuerdas aún no ha sido desarrollada. La teoría actual es tan sólo una construcción teórica cuyos elementos conceptuales han sido aportados por la Relatividad, la Mecánica Cuántica, la Supersimetría y los objetos extensos unidimensionales. A falta de un principio fundamental sobre la lógica de la teoría de las supercuerdas, se ha tomado como guía los principios de la Relatividad Generalizada, pues estos deben

ser un caso particular del principio fundamental. Se especula sobre la naturaleza geométrica de este principio, debido a la naturaleza geométrica de las fuerzas de Yang-Mills y de las gravitatorias. Al margen de las necesidades de una intuición unificadora sobre la lógica de la teoría, existen hoy muchas cuestiones en la estructura de la teoría de las supercuerdas que esperan el descubrimiento de ese principio fundamental; principio que definiría, de forma exacta, la simetría subyacente de la teoría de las supercuerdas (30) (31) (32).

Señoras, Señores, muchas gracias.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ZUBIRI, X.- Naturaleza, Historia, Dios. Alianza editorial, 1987.
- [2] LORENTZ - Electromagnetic phaenomena in a system moving with any velocity smaller that of light. Proceed Acad. Sc. Amsterdam, 6, p. 809,1904.
- [3] EINSTEIN, A. - Annalen der Physik 17, 891-921, 1905.
- [4] WHITTAKER - History of the theories of aether and electricity. vol. 2, 1953.
- [5] FEINBERG, G. - Physical Review 159, 1967.
- [6] EINSTEIN, A. - Preussische Akademie der Wissenschaften Sitzungs Berichte pt. 2. pp. 778-786, 799-811, 813-839, 844-874, 1915.
- [7] UJEMOW, A. L. - Problemas filosóficos, pp. 172-180, 1954.
- [8] MITTEELSTAEDT - Problemas filosóficos de la Física Moderna. Ed. Alhambra, 1969.
- [9] SCHWARSCHILD, K.- Sitzber Deut. Akad. Wiss. Berlin Kl. Math. Phys. Tech., 189, 1916.
- [10] OPPENHEIMER, SNYDERH J.R. - Physical Review, 56, 455, 1939.
- [11] KERR, R. P. - Physical Review Letters, 11, 237, 1963.
- [12] NEWMAN, E. T. - J. Math. Phys., 6, 918, 1965.
- [13] PENROSE, R. - Rev. Nuovo Cimento, 1, 252, 1969.
- [14] HARTLE, J. B. - Physics Reports, 46, N. 6, 201-247, 1978.
- [15] CARTER, B. - Physical Review, 141, 1242, 1968.
- [16] HAWKING, S. W. - Physical Review D, 14, 2460, 1976.
- [17] HAWKING, S. W. - Historia del Tiempo, Ed. Crítica, Barcelona, 1955.
- [18] KALUZA, E. - Sitzungsberichte der Berlin Akademie, 1921.
- [19] WITTEN, E. - Nuclear Physics, 189, 412.
- [20] DIRAC, P.A. M. - Principios de la Mecánica Cuántica. Ed. Ariel, Barcelona, 1967.
- [21] SCHWINGER, J. - Selected papers on QED, Dover Pub., 1958.
- [22] CURIE, P. - Sobre la simetría de los fenómenos físicos, Obras, p. 126.
- [23] YANG, C. N., Mill, S. R. - Physical Review, 96, 191, 1954.
- [24] HIGGS, P. W. - Physical Review Letters, 13, 508, 1964.
- [25] HOOFT, G. - Nuclear Physics B, 35, 167, 1972.
- [26] WEINBERG, S. - Physical Review Letters, 19, 1269 (1964).
- [27] SALAN - Elementary Particle Theory, Stockholm, 1968.
- [28] CREMMER-JULIA-SCHERK - Phys. Letters, V. 96B, N. 4, 409, 1978.
- [29] WITTEN, E. - Nuclear Physics B, 185, 3, 412, 1981.
- [30] SCHWARZ-WIFTE - Superstring, Cambridge University, 1977.
- [31] GREEN - Nature, 314, 6010, 674, 1985.
- [32] RUJULA - Nature, 320, 6069, 678, 1986.

**DISCURSO PRONUNCIADO POR EL
EXCMO. SR. D. ANTONIO CIVIT BREU**

*Académico Numerario de la Academia en
contestación al leído por el
ILMO. SR. D. PABLO HERVAS BURGOS
en el acto de su recepción como Académico
Numerario celebrado el 31 de Octubre de 1989*

Ilmo. Sr. Presidente Ilmos. Sres. Académicos Señoras y Señores:

Por mandato de mis compañeros de la Academia Sevillana de Ciencias, mandato que agradezco, tengo el honor de representar a la Academia con el protocolario discurso de contestación al del nuevo miembro numerario de la misma Prof. Dr. D. Pablo Hervas Burgos.

Nada podía complacerme mas que el encargo ahora estoy cumpliendo. Conocí al Prof. Hervas en nuestros tiempos de PNNs de la Universidad Complutense; El, un apasionado de la Física Teórica , un concepto a mi entender, por lo menos difuso ya que, en mi opinión, la Física o tiene una fuerte base teórica o no es Física, yo integrado en un Instituto del CSIC, mas afín a unas tecnologías de aplicación como son la Electrónica y la Automática, las dos, como debe ser, con una fuerte base teórica.

Nada hacia pensar en que, pasados los años, íbamos a coincidir en la Academia Sevillana de Ciencias. Ya han oído Vds. al Prof. Hervas en su magnífica disertación sobre “La Relatividad como paradigma de las Teorías Unitarias” y por consiguiente poco puedo añadir al concepto que sobre su profundidad de análisis y pedagogía de exposición se habrán hecho todos Vds.

Realmente era casi imposible encontrar un tema de mas actualidad en la Física que la búsqueda de una Teoría Unitaria, tema que ha dominado la Física del siglo XX y que en los últimos treinta años ha recibido un empuje tan importante que ha permitido decir a HAWKING: “..existen en este momento (1984), bases para un cauteloso optimismo y pensar que una Teoría Unitaria completa esta en el horizonte.... y pienso que tendremos tal teoría al final de este siglo... si no desaparecemos primero nosotros”, lo que en mi opinión, y en la de otros muchos, equivale a decir que la Física se habrá terminado.

No es la primera vez, como bien saben Vds. en que por boca de un científico

de indudable talla se ha hecho una afirmación parecida. El ejemplo, que al escribir estas líneas me es mas inmediato es la frase de Max BORN en 1920 a un grupo de visitantes de Gottingen: "La Física estará terminada en seis meses", esto lo decía unos meses antes de descubrirse las leyes que gobiernan el electrón.

El éxito de las teorías de SALAM y WEINBERG (1967) al proponer una Teoría Unificada del Electromagnetismo y las Interacciones Nucleares Débiles, postulando las nuevas partículas W y Z, (partículas que recibieron su confirmación experimental en 1982 en el CERN). Recordemos que el Premio Nobel de Física 1979, fue concedido a SALAM, WEINBERG junto a GLASHOW, que había propuesto una teoría análoga.

Al hablar de Teorías Unitarias y hacer incapie en la Relatividad como paradigma de las mismas, como hace el nuevo académico de esta Sevillana de Ciencias no puedo menos que recordar que la hipótesis de MACH, las ecuaciones de MAXWELL y la constancia de la velocidad de la luz que esta implican, son las razones de la creación de esta teoría, cuyos éxitos no es necesario recalcar aquí, lo que si me parece importante señalar, en éste momento, es que el gran problema actual de la Física está en la unión de la Relatividad y la teoría cuántica. La primera piedra hacia este objetivo ya esta puesta con el análisis por PENROSE y HAWKING de los agujeros negros de KERR.

La posibilidad que estos agujeros negros no sean tan "negros" y la posible emisión de partículas por los mismo fue puesta de manifiesto por HAWKING y es el primer éxito de una teoría que intenta asociar a la Relatividad los resultados y principios de Mecánica Cuántica.

Una cierta disquisición me parece importante. La creación de una Teoría Unitaria que englobe las Interacciones Nucleares, el Electromagnetismo y la Gravedad sería - o será - según sea el grado de optimismo de cada uno, el mas perfecto monumento a la capacidad del intelecto humano y su gran aplicación: la cosmología, es decir el conocimiento de las leyes que rigen nuestro universo y por consiguiente su evolución y que, desde que se observó el orden que existía en el mismo, pasando por los tiempos de la mitología, ha sido un autentico reto al hombre, que nunca ha renunciado a formular.

El estudio de este universo, el único que nos consta que existe, coincide prácticamente con la historia de la Física. Los nombres de Tolomeo, Copernico, Galileo, Newton, Einstein, Friedmann, Hubble, Olbers, Hawking, Penrose etc..etc. son eslabones importantes de esta historia.

Es curioso señalar que los inventores del Transistor: BARDEEN, BRATTAIN y SHOCKLEY (Premios Nobel de Física 1956) así como PENZIAS y WILSON (Premios Nobel de Física 1978) descubridores de la radiación cósmica de 3k, posiblemente el mas importante descubrimiento aislado de la cosmología, pertenecían al personal científico adscrito a la Bell Telephone Laboratories, demostrando cuanto puede influir en el desarrollo de la ciencia y de la tecnología una empresa con visión de futuro.

Notemos, con HAWKING, que la solución del problema cosmológico, no implica la posibilidad real de resolver, en un tiempo prudencial, muchos problemas concretos cuya complejidad, por el número de elementos implicados en los mismo, puede superar la capacidad de cálculo del mas rápido ordenador hoy imaginable.

Dada una definición provisional de la Física como la ciencia que busca las leyes del universo y como consecuencia la evolución de los sistemas enormemente grandes (a escala humana) y los sistema ultra pequeños y los de todos los sistemas intermedios y aceptando que “conocer” equivale a decir que sabemos como se comportan a partir de la correcta aplicación de unas reglas matemáticas. Hoy estamos muy lejos de la formulación de estas leyes para todo el universo. EINSTEIN puso los cimientos al formular de una forma general la conexión espacio/tiempo hasta el dos conceptos absolutamente independientes y dar una explicación física a lo que desde el -Einstein- se ha llamado el principio de Mach, tratado con su habitual maestría por Hervas en el discurso que me ha precedido -La experiencia del cubo de agua.- Se trata aquí de aclarar la naturaleza del espacio y del movimiento, intentando poner de manifiesto lo que estos conceptos tienen de relativo y de absoluto. La solución genial de EINSTEIN esta en resolver la cuestión sin acudir a ningún campo, ni fuerza, ideado expresamente para la solución de este problema.

En efecto, basta considerar correctamente la acción gravitatoria del resto del universo sobre el cubo de agua. Esto, como todo, o casi todo, lo que hizo EINSTEIN corresponde a rasgos de genio, y digo “casi todo” recordando la introducción de la llamada “constante cosmológica” cuya necesidad o superfluidad hoy no está suficientemente aclarada, pero que fue calificada por el mismo Einstein como “la mayor pifia que había cometido en su vida”.

Uno da gracias a Dios al ver que los grandes genios también cometen errores y que han tenido el valor de equivocarse y publicar aquellas ideas que, en un memento determinado les han parecido lo suficientemente elaboradas para someterlas al juicio de la comunidad científica. Un contra ejemplo evidente es CAVENDISH que, como es bien sávido, descubrió con muchos años de anticipación al propio COULOMB, la ley que conocemos con este nombre pero que guardo para su cuaderno de laboratorio, retrasando con ello el avance de la Física en aproximadamente medio siglo. La pregunta: ¿como seria hoy la Física si Cavendish hubiera hecho públicos sus experimentos? quedará siempre en el aire y cualquier respuesta que inventemos, no pasará de mera hipótesis. Que el universo no es estádico, está hoy, fuera de toda duda razonable. Las ideas de BONDI, GOLD, y HOYLE expuestas en 1948 sobre un “Universo Estacionario” eran en mi opinión, realmente geniales y tenían la enorme ventaja de, en gran parte, ser posible su confirmación experimental. Tengo que reconocer que a mi particularmente me entusiasmo la idea de la creación continua de materia que su teoría implicaba, en claro desafío con el principio de la conservación de la energía, pero en cantidades, muy por debajo de toda demostración experimental que invalidara del famoso y siempre superviviente principio.

La puntilla definitiva a la teoría del “Universo Estacionario” se la dieron PENZIAS y WILSON al descubrir la radiación cósmica de 3k, para la que no había explicación posible dentro de la teoría de Bondi, Gold y Hoyle.

Quisiera dedicar unos pocos minutos a las ideas de HAWKING asociando la superficie del horizonte es decir, su frontera o límite del “agujero negro” con la entropía. Ideas que se hacen mas profundas cuando se asocia la superficie límite del “agujero negro” con la gravedad superficial, de la misma forma que, a la entropía se le asocia la temperatura.

Es decir, si a un cambio de entropía, esta asociado a un cambio de temperatura, se tendrá que: a un cambio de la superficie límite del “agujero negro” corresponderá un cambio de gravedad superficial. El significado de esta analogía fue absolutamente desconocido hasta 1974 en que HAWKING demostró con ayuda de la Teoría Cuántica aplicada a la formación de “agujero negro” por colapso gravitacional que, cuando este proceso se da, existe una emisión de partículas a partir del horizonte con un espectro puramente térmico y que la temperatura de la radiación emitida aumenta rápidamente a medida que la masa del “agujero negro” disminuye, deduciendo de ello que para un “agujero negro” de la masa del Sol la temperatura correspondiente es $10E-7k$, lo que representa una radiación absolutamente insignificante, radiación que es haría explosiva a medida que disminuyera la masa del “agujero negro”.

Pablo HERVAS, hace unas profundas disquisiciones sobre la geometría espacio/temporal del universo poniendo el dedo en la llaga sobre una de las cuestiones mas importantes de la Física de hoy: La dificultad de poder afirmar si nuestro universo -el único- es abierto o cerrado. La cuestión parece resuelta a favor de un universo abierto en función de las determinaciones de su densidad media y del valor de la constante de HUBBLE, que si bien están sujetas a una importante incertidumbre dada la dificultad de medir estos parámetros y de cuestionarse la validez de la linealidad de la ley de HUBBLE para corrimientos incrementales relativos del orden de 1, de hecho se han medido superiores a 3 y así como la “constante” de HUBBLE depende de dR/dt (R = radio de curvatura del universo, función de t) las diferencias entre la linealidad y los valores observados son función de d^2R/dt^2 . Recordemos que $R(t)$ está ligado a la métrica de ROBERTSON y WALKER a partir de los postulados de homogeneidad e isotropía (el llamado Principio Cosmológico). Es importante recordar que esta métrica fue utilizada ya en 1920 por FRIEDMANN para construir sus modelos del universo sin partir de ningún principio general.

La situación actual del pensamiento científico supone un universo abierto que empezo en una singularidad y que en el supuesto que fuera cerrado acabará en otra singularidad que, no tiene porque, coincidir con la primera. La creencia (hasta 1965) que el modelo de FRIEDMANN no implicaba singularidades cambio radicalmente con los trabajos de PENROSE de esta fecha (1965) demostrando que las causas que se oponen a una nueva singularidad, es decir: la precisión y la

rotación, de hecho aumentan las fuerzas gravitatorias y con ello favorecen la singularidad a la que aparentemente se oponen.

Es importante considerar que estos efectos acumulativos no son eficaces hasta dimensiones del orden de la longitud de PLANCH= $1.6 \text{ E-}23 \text{ cm.}$ y densidades del orden de $10\text{E}93\text{gr/cm}^3$ lo que equivale a decir que ya se esta en presencia de una “real” singularidad.

En fin quedan muchas preguntas para contestar, o lo que es lo mismo un gran campo para investigar y experimentar, y si bien es verdad que lo logrado no es poco lo mas importante es la confianza en que, sobre cosmología y teorías unitarias, estamos ya “al principio del fin”.

Las dudas sobre la “naturaleza científica” de la Cosmología (dada su diversidad con las otras ciencias experimentales), así la necesidad de extrapolar sin conocer que volumen y tiempo es suficientemente grande para que la extrapolación tenga sentido. La imposibilidad de repetir experiencias. El hecho de tener un solo universo al que, gracias a Dios, no nos es dado modificar, hacen de la cosmología una ciencia singular en la cual las teorías unitarias tienen su plena aplicación.

La hipótesis: pese a todas estas dificultades, la mente humana es capaz de llegar a una formulación que explique los orígenes y futuro de nuestro universo, es cada vez mas verosímil y el solo hecho de haberlo intentado es ya todo un éxito. De hecho la historia de la humanidad, como he dicho antes a propósito de la Física, puede resumirse en la búsqueda de esta formulación o lo que es lo mismo las leyes que rigen nuestro entorno.

Permitanme pues felicitar al Prof. Hervas, darle la bienvenida a nuestra Academia que tanto espera de su colaboración y agradecerle la magnífica disertación que sobre estos temas acaba de darnos.