*LLULL, vol. 19, 1996, 347-362*

# ESTANCAMIENTO EN LA FISICA DE PARTICULAS Y FLORECIMIENTO DE LA FISICA MATEMATICA 1975-2000*

LUIS J. BOYA
Universidad de Zaragoza

*RESUMEN*

*Se destaca la escasez de nuevos resultados en la Física de las Partículas Elementales desde el establecimiento del modelo standard hacia 1975. Se pone de relieve el contraste con el enorme desarrollo de muchas áreas de la Física Matemática en el mismo periodo; se presenta un esquema de la situación al final del siglo.*

*ABSTRACT*

*The scarcity of new results in Elementary Particle Physics since the establishment of the standard model around 1975 is stressed. The contrast with the enormous developments in many areas of Mathematical Physics in the same period is pointed out; and an outline of the situation by the turn of the century is sketched.*

Palabras clave: Física de Partículas, Física Matemática, Siglo XX.

## 0. Introducción

Encontramos hoy una curiosa paradoja en la ciencia de lo muy pequeño, en el reino de la Física de las Partículas Elementales: por un lado, desde 1975 aproximadamente no han aparecido resultados nuevos importantes; por aquella época quedó establecido el llamado *modelo standard,* y no ha cambiado desde entonces. El modelo ha sido confirmado en numerosos experimentos pertinentes, pero estéticamente es muy insatisfactorio y depende de un gran número de parámetros arbitrarios. Además, los problemas que el modelo

---

* Elaboración de la comunicación presentada en el *XIX International Congress of History of Science* (22-29 agosto 1993, Zaragoza).

*Recibido el 8 de octubre de 1996*

*standard* tenía pendiente desde su origen siguen en la actualidad sin haber sido resueltos.

Por otra parte, ha tenido lugar en ese periodo un enorme desarrollo en Física Matemática, con grandes beneficios incluso para la matemática pura. Conceptos y disciplinas matemáticas superiores como Teoría de Fibrados, Topología Algebraica, Homotopía, Teoremas del Indice, Geometría Algebraica, etc., han pasado a ser lugar común entre los físicos teóricos. Estos desarrollos, sin embargo, no han contribuido a avanzar en los problemas pendientes del modelo *standard.*

Esta es la paradójica situación en que nos encontramos ahora. Creemos que semejante situación de estancamiento no se había presentado en la física en los dos últimos siglos; con respecto al segundo punto, aunque la física matemática ha estado siempre muy cerca de las matemáticas puras, ahora está aún más.

En este artículo consideramos esta situación. Nuestro programa comprende los siguientes puntos:

1) El paradigma de las partículas elementales en 1975
2) Las grandes expectativas que no han sido satisfechas
3) Los pocos avances reales llevados a cabo desde 1975
4) Las matemáticas se apoderan de la física teórica
5) La situación presente, al final del siglo

Este informe pretende sólo ser una *constatación* de los hechos; no nos preocuparemos mucho de analizar las causas o de buscar remedios a la situación que encontramos; esto lo dejamos a los historiadores y a los filósofos de la ciencia ...

## 1. Paradigma de las Partículas Elementales en 1975

Entre 1967 y 1973 tuvo lugar una revolución en microfísica, que combinó y culminó desarrollos anteriores, en particular el programa de renormalización en teoría cuántica de campos de los años cincuenta (Tomonaga-Schwinger-Feynman), la descripción de las interacciones por un mecanismo de *gauge*, es decir, *more geométrico* (campos de Yang y Mills, 1954), el modelo de *quarks* como constituyentes elementales de los hadrones y el álgebra de corrientes de los años sesenta (Gell-Mann, Adler, Weinberg). La incorporación de estos avances produjo un esquema unificado, que se llamó el

*modelo standard*, que pretende incluir en un solo marco conceptual toda la física del microcosmos, es decir, toda la física excepto la gravitación.

Esta síntesis gigantesca está dominada por dos principios teóricos generales, a saber:

1) El *Principio de Gauge** para generar las fuerzas (interacciones) de un modo geométrico, que es una extensión del principio que Einstein desarrolló ya en la Teoría General de la Relatividad para comprender las acciones gravitatorias.

2) La *Unificación de las fuerzas* como el objetivo último, objetivo que también Einstein persiguió durante toda su vida, en especial en sus últimos años; se trata de entender los efectos atribuibles a fuerzas distintas como originados en una causa común.

Dos ingredientes adicionales importantes del modelo actual son: la *renormalizabilidad* de la teoría como criterio de aceptación, es decir, un algoritmo para obtener resultados sensibles, finitos, de una teoría que contiene infinitudes, y la *rotura* (espontánea) de la *simetría,* que sostiene que muchas simetrías aparentes en la naturaleza se realizan de un modo sutil, estando presentes en las ecuaciones originales pero no en el conjunto de soluciones que aparecen en el mundo físico.

Por lo menos desde 1960 se sabe que cuatro tipos de fuerzas son necesarias como mínimo para explicar el mundo de la (micro)física. La *interacción electromagnética* cuando se aplica en la mecánica ondulatoria debe entenderse como una teoría *gauge*, según los trabajos de H. Weyl y F. London de 1927; no se hablaba entonces de principio *gauge*, sino de principio de acoplamiento electromagnético mínimo. La situación ideal sería un principio de *gauge* también para las *interacciones fuertes,* que son las responsables de la estabilidad de los núcleos atómicos. Una teoría *gauge* de las interacciones

---

* El término inglés *gauge* resulta intraducible. Su origen es el siguiente. En 1917 H. Weyl inventó una extensión de la relatividad general de Einstein, considerando cambios de escala de la métrica, lo que él llamó *Eichinvarianz*; el término alemán *Eich* significa calibre o aforo; corresponde al término francés *jauge* y al inglés *gauge*; por ejemplo, en inglés se dice *pressure gauge* para un medidor de presión, o *narrow gauge* para (los ferrocarriles de) vía estrecha. Los rusos utilizan el equivalente de *invariancia de gradiente*, que corresponde a la caracterización matemática actual, que no es ya el cambio de *escala* visionado por Weyl, sino un cambio de *fase local.* El término inglés, por supuesto, ha prevalecido. Los intentos sudamericanos por traducir al español el término por aforo, calibre, medida, norma o contraste están condenados al fracaso.

fuertes fue descrita por Yang y Mills en 1954, aunque ideas parecidas aplicables a las *interacciones débiles* están implícitas en la primera teoría de la desintegración beta (Fermi, 1934) y más claramente aún en un trabajo de O. Klein de 1938. Las interacciones débiles son responsables de ciertos procesos subatómicos importantes, como la desintegración del neutrón o las interacciones de los neutrinos. Por supuesto la *gravitación* como teoría geométrica estaba ya desarrollada, como hemos dicho, desde la teoría general de Einstein (1915), de acuerdo con el principio de *gauge*, pero nunca se realizó la fusión de la gravitación con la teoría cuántica de modo satisfactorio.

Principio de *gauge,* unificación y renormalizabilidad de las interacciones débiles y electromagnéticas concurren en el trabajo fundamental de S. Weinberg [1] (poco después descubierto también por Salam, 1968). Esta *teoría electrodébil*, como se la conoce hoy en día, incorpora una teoría *gauge* no conmutativa, con la ruptura espontánea de simetría llevada a cabo por un misterioso bosón de Higgs, desconocido hasta el momento y del que no se puede ni siquiera predecir la masa. Los portadores de la fuerza electrodébil son los llamados bosones vectoriales masivos, llamados W y Z, y el fotón, viejo conocido, que permanece sin masa.

La teoría *gauge* de las interacciones fuertes, la llamada *cromodinámica cuántica* (Q.C.D.) es obra de Gell-Mann y colaboradores y se desarrolló en 1971-73 [2]. Esta teoría parte de una simetría también *gauge* no abeliana pero exacta, no rota. Los portadores de la fuerza, los llamados *gluones*, no tienen por tanto masa, pero aparecen confinados, no se pueden presentar en estado libre. No se pueden llevar a cabo cálculos en el régimen de energías bajas, cuando domina el confinamiento, por lo que la teoría no puede dar cuenta del espectro de los hadrones, tan bien conocido experimentalmente, y su poder predictivo es muy reducido.

Los intentos de *unificación de las tres fuerzas* pertinentes al mundo subatómico eran inevitables. El primero surgió ya en 1974 [3], y es debido a Georgi y Glashow, pero nunca capturó el interés del modelo electrodébil o de la Q.C.D.; la escala a la que las tres fuerzas aparecen unificadas está muy alejada de lo que se puede experimentar directamente [4].

El nuevo aspecto (¿feo?) de esos desarrollos fue la necesidad de introducir la *rotura de la simetría*: la fuerza débil es de alcance limitado, por lo que los bosones de gauge débiles tienen que ser masivos y, por ello, la simetría *gauge* no debe estar presente en el vacío; no parece que haya escape a esta situación, aunque estamos lejos de comprender completamente los mecanismos de rotura de simetría. El mundo hadrónico presenta además otro ejemplo de simetría rota, la llamada *simetría quiral*. Es ésta una simetría de las llamadas globales,

no es de tipo *gauge* (local) y es sólo aproximada, dependiendo de la pequeñez de las masas de los dos *quarks* más ligeros. La simetría quiral aproximada y rota en el vacío garantiza que el hadrón más liviano, el mesón pi (los tres piones) tenga una masa muy escasa frente a la escala hadrónica.

Los *quarks* aparecen cuasiestáticos, confinados en los hadrones; ni ellos ni los gluones, la *cola* que mantiene a los *quarks* pegados, pueden presentarse en estado libre; esta propiedad, no comprendida bien aun hoy día, se llama *confinamiento*. Por otra parte, en el régimen opuesto, a alta energía, se tiene lo que se llama *libertad asintótica* [5], que está mejor entendida y bien comprobada experimentalmente: la constante de acoplamiento efectiva, que mide la intensidad de la interacción, disminuye con una ley determinada cuando los procesos ocurren a energía alta. Una vez dentro de los hadrones, los *quarks* están esencialmente libres.

Esta era la situación hacia 1975; el *modelo standard* que acabamos de bosquejar daba cuenta de la mayor parte de nuestros experimentos. Ciertamente había alguna que otra nubecilla, fenómenos no bien comprendidos, como la violación de CP (simetría discreta que intercambia cargas y refleja espacialmente), que no se ajustaban bien al modelo, la naturaleza de los neutrinos, que podrían ser masivos y mezclarse, el protón, que debería tener vida media finita, etc. Pero por otra parte la teoría era capaz de explicar y predecir un enorme número de datos experimentales, con escalas de energías que variaban desde pequeños efectos como el desplazamiento Lamb (Lamb *shift),* al nivel del mili-electrón voltio, hasta difusión *(scattering)* de hadrones a 500 Gev, un factor ¡de 15 órdenes de magnitud mayor!

Una soberbia introducción al *modelo standard* con énfasis en las teorías gauge y los mecanismos de ruptura de simetría la constituye el libro de Quigg [6].

## 2. Las grandes esperanzas no cumplidas

Los aspectos insatisfactorios del *modelo standard* se han ido agravando con el tiempo y ninguno de sus rasgos dudosos han sido aclarados entre tanto; citemos algunos de ellos:

i) El modelo necesita *más de 20 constantes* fundamentales, sin que realmente comprendamos ninguna de ellas; no parece haber esperanza inmediata de reducir ese número. Masas, constantes de acoplamientos, número de generaciones, etc., son datos empíricos del modelo sin justificación ulterior.

ii) No hay prueba alguna teórica satisfactoria del confinamiento de los *quarks*.

iii) No se ha incorporado la gravitación a la teoría; peor aún, no existe una teoría cuántica satisfactoria de la gravedad (la gravitación, como una teoría de campos, corresponde tras cuantización a una teoría del tipo *no renormalizable*).

iv) No hay mecanismo natural de violación de CP, proceso que por otra parte se da sólo en un reducido número de situaciones (desintegración del mesón K neutro en piones).

v) No hay un modelo admitido de gran unificación: las predicciones inmediatas de todo modelo de gran unificación, como serían la desintegración del protón o las masas de los neutrinos, no se han verificado.

vi) No hay explicación alguna racional de las masas de las partículas, ni siquiera de las escalas de masas; ellas varían desde la masa del electrón, de 1/2 Mev, hasta la masa del *quark top*, alrededor de 137 Gev*.

vii) Hay unas misteriosas *reglas de selección* que no tienen su origen en el principio de *gauge*, pero que son muy efectivas. Así por ejemplo, la desintegración del muón en el modo fotón más electrón no se ha verificado, como tampoco se observa la desintegración del protón. No sabemos aún si hay mezcla entre los tres tipos de neutrinos, etc.

Realmente, nuestra comprensión del mundo microscópico no ha avanzado casi nada desde el establecimiento del paradigma, hacia 1975. Muchas ideas más o menos atractivas se han propuesto desde 1973-75 para superar las dificultades aludidas antes, pero ninguna ha sido mayormente exitosa. Señalemos algunas de ellas.

Grandes esperanzas se pusieron en la *supersimetría*; una simetría peculiar que intercambia bosones con fermiones, descubierta al principio de los setenta (Wess y Zumino fueron los primeros en estudiarla en la teoría de campos en 1974 [7]). Con supersimetría la situación mejora un poco: se comprenden ciertas jerarquías de masas, deasaparecen algunas divergencias (integrales de valor infinito), pero todavía no es suficiente para hacer convergente (es decir, finita) la teoría cuántica de la gravitación, amén de predecirse parejas supersimétricas para todas las partículas existentes, ¡sin que se hayan

---

* Los párrafos con asterisco (*) aparecen comentados especialmente en el *Apéndice* escrito en noviembre de 1996.

encontrado ninguna aún! La supersimetría incorpora la gravitación al hacerse una simetría local.

La idea de que el espacio pueda tener *dimensiones extra* que no se sienten por estar curvadas, pero que pueden ser el asiento de ciertas fuerzas que aparecen en el espacio ordinario, es muy antigua (teoría de Kaluza, 1919 y Klein, 1926) y ha sido resucitada recientemente [8] en conexión con supersimetría y supergravedad.

La teoría del *tecnicolor* [9] proporciona una alternativa al mecanismo de ruptura espontánea que permite prescindir del enigmático bosón de Higgs al precio de introducir nuevas interacciones *gauge* a muy alta energía, que no han sido observadas. Los modelos de *partículas compuestas* (preones, etc., ver [10]) se sugieren por si mismos, ante la proliferación de partículas *elementales*; intentan reducir el número de *quarks* (3 colores x 6 sabores x 2 (anti*quarks*) en el modelo convencional). Los modelos compuestos son muy poco convincentes. Se inventan además partículas nuevas, como los invisibles *axiones*, para resolver *ad hoc* el problema llamado de violación fuerte de CP [11], etc.

## 3. Avances reales (pocos) desde 1975

Para ser honestos, tenemos que constatar que algo se ha avanzado en nuestra comprensión del mundo físico desde 1975:

1) La solución de la anomalía quiral, que es el llamado convencionalmente *problema U(1)* mediante los *instantones* [12]. El problema es que debería haber cuatro mesones casi sin masa, puesto que el grupo de simetría global quiral rota tiene dimensión cuatro, y sólo hay tres, los piones. La anomalía de la corriente axial viene al rescate, aunque todavía esa explicación es disputada por algunos (e.g. por Crewther)*.

2) Los cálculos modernos con potentes ordenadores para la teoría *gauge* de los hadrones (cromodinámica) en una red (*lattice*) se están acercando a *probar* el confinamiento y a determinar teóricamente algunas masas hadrónicas [13]. Aquí podríamos decir (parodiando a Wigner): el *computer* parece que entiende las interacciones fuertes; ¡ahora NOSOTROS querríamos también entenderlas!

3) Hay ya *tests* de gran precisión de la teoría electrodébil y en especial de la electrodinámica cuántica; pero incluso aquí hay nubecillas, como la posible estructura extensa del electrón por debajo del attómetro ($10^{-18}$m), pequeñas

discrepancias en el ritmo de desintegración del positronio, factores hadrónicos desconocidos en la estructura hiperfina del átomo de hidrógeno, el problema de las desintegraciones débiles no leptónicas, que viene de muy antiguo, etc.

4) Las partículas W y Z, los portadores de la interacción débil, fueron desde luego descubiertas a fines de 1983 (C. Rubbia en el CERN [14]). Pero habían sido predichas con toda claridad y el acelerador que las produjo había sido adaptado precisamente para ello (Rubbia y van der Merwe).

5) Se han dado importantes avances en astrofísica de partículas. Poseemos hoy una descripción bastante detallada del comienzo del Universo, hasta la época de formación de las galaxias, hace diez mil millones de años. Una magnífica revisión puede verse en el libro de Kolb y Turner [15].

## 4. El abrazo del oso de las Matemáticas

Volvamos ahora nuestra atención a la física matemática. También el año 1975 representa una inflexión importante en la aplicación de la matemáticas en física moderna: uno puede incluso señalar exactamente dos hechos que han disparado una revolución importante:

1) La interpretación por C.N. Yang y T.T. Wu [16] de las teorías *gauge*, en particular de la electricidad, incluso con monopolos magnéticos, como conexiones en fibrados vectoriales, siguiendo la guía del gran matemático S.S. Chern; ¡estas tres personas son chinas!

2) La aplicación del programa *twistor* de Penrose al cómputo del número de instantones, primeramente por Atiyah [17], introduciendo una matemática muy moderna para la física, como el teorema del índice, desarrollado por Atiyah mismo con Singer, Bott, Patodi, etc. en el periodo 1963-1976.

De repente, los físicos teóricos se ven en la necesidad de absorber una parte considerable de la matemática moderna; el nuevo *syllabus* comienza por la geometría diferencial, pero pasada esa barrera, son necesarias la topología algebraica (para comprender los números cuánticos *topológicos*), la geometría algebraica (para construir soluciones explícitas de solitones), la teoría de nudos, etc. Aparecen nuevas y curiosas ramas de la física teórica, como la teoría de campos topológica. La gran figura de los años 80 en estos dominios es el físico teórico Edward Witten [18], quien obtiene la medalla Fields en 1990, un premio en matemáticas puras (otros medalla Fields de aquel año están también relacionados con la física: A. Drinfeld y V. Jones).

Se recupera así una gran tradición, que había sido interrumpida desde 1910-15, desde la época de Poincaré y Hilbert, de una íntima relación entre la física teórica y las matemáticas. Por supuesto, durante la mayor parte del siglo XX uno puede, con cierto esfuerzo, apuntar a algunos matemáticos con un *penchant* por la física, como H. Weyl, J. von Neumann, G. Mackey o A. Kolmogorov, pero no hay muchos, realmente, y ciertamente se puede decir que el desarrollo de las matemáticas entre 1920 y 1980 fue llevado a cabo bien independientemente de la física teórica y viceversa.

Para señalar sólo un ejemplo: en 1954 se descubren por un lado la teoría de los campos de Yang y Mills, a la que ya hemos aludido, y por otro la teoría general de conexiones en fibrados (Ehresman), ¡que es justo la herramienta matemática adecuada para tratarlos! Los dos inventos se ignoran uno al otro durante más de veinte años. En general, la física teórica precede a las matemáticas (siguiendo una tradición que enlaza Newton con Heaviside, por ejemplo). Así, Dirac *inventa* las distribuciones [19] veinte años antes que Schwartz, y los números (cuánticos) topológicos, es decir, las integrales de clases características [20] cinco antes que Whitney, por citar sólo dos casos de precocidad.

Desde 1975 áreas completas de las matemáticas se abren a la física; viceversa, nuevas herramientas sugeridas desde la física, hacen avanzar las matemáticas, como la teoría de grupos cuánticos [21], los estudios de variedades de dimensión tres y cuatro por métodos derivados de teorías *gauge* (Floer, Donaldson, Uhlenbeck); la teoría de Morse se beneficia de la mecánica cuántica supersimétrica, etc. Matemáticos de primera línea como Atiyah, Bott, Singer, Manin, Novikov y otros vuelven sus ojos a la física, como antaño habían hecho todos, desde Newton a Hilbert.

Una importante rama de la matemática aplicada la constituye el estudio de los *modelos integrables*; se trata de sistemas dinámicos que exhiben tantas constantes del movimiento como grados de libertad y de los que hasta 1970 se conocían muy escasos ejemplos. El gran avance se produce cuando Kruskal y sus colaboradores descubren (1967) la técnica del *scattering* inverso [22] para resolver por primera vez una ecuación diferencial parcial no lineal. Nótese que de nuevo la física proporciona la primera clave *(scattering)*. El método es sistematizado por Lax [23]; la técnica de los pares de Lax supone el primer avance importante para resolver problemas en mecánica analítica desde los métodos de separación de variables de Jacobi y Stäckel.

Al nivel cuántico aparecen las ecuaciones de Yang-Baxter [23] como condición de solubilidad, y derivaciones del método de *scattering* inverso cuántico dan lugar, entre otras cosas, a la teoría de los grupos cuánticos,

enlazando eventualmente con la geometría no conmutativa que A. Connes, otro matemático medalla Fields muy interesado por la física, había inventado desde otros orígenes. Como consecuencia, se comprenden muchos modelos de teorías de campos en dos dimensiones [24], se incorpora la invariancia conforme como característica crucial en diversos sistemas estadísticos cerca del cambio de fase (Polyakov), etc.

La supersimetría en teoría cuántica de campos alcanzó el final de su extensión natural hacia 1984, cuando se demostró la no renormalizabilidad de la supergravedad [25] en once dimensiones. Entonces la teoría de las *supercuerdas* acudió al reemplazo; se trata de partir como entidad elemental no del punto, sino de una cuerda, una variedad que en el espacio se presenta como unidimensional, mientras que el punto no tiene dimensiones. En ese mismo año Green y Schwartz probaron [26] que la teoría de las supercuerdas, objetos éstos que deben vivir en diez dimensiones espacio-temporales y que necesariamente incorporan la gravedad, es una teoría aparentemente consistente (libre de anomalías y convergente). Para algunos pareció la solución final y, en su ingenuidad, la llamaron pomposamente la *teoría del todo*, T.O.E. No se podía calcular nada, no predecía nada, no resolvía nada*. Pero era una teoría preciosa [27] ... que potencialmente podría incluir todas las fuerzas en un esquema cuántico convergente. La teoría hace gala, también, de gran esoterismo matemático: superficies de Riemann, espacios de Teichmüller, teoría del índice de familias, espacios de Calabi-Yau, grupos de Lie excepcionales, etc.

Diez años después la teoría de supercuerdas es todavía una esperanza piadosa, pero pocos piensan aún que es realmente la teoría final*... y todavía la teoría de supercuerdas no puede exhibir ni siquiera un solo resultado* en física de partículas ... A pesar de ello, la belleza de la dama es innegable y mucha gente ha quedado prendada en sus redes ...

La tentación que sufren los matemáticos de contribuir a la física es grande. El último *brainchild* de Atiyah, la Teoría Topológica de Campos [28], podría ser una etapa adelante (o atrás?) desde la geometrización de Einstein de las fuerzas: no hay ya ni geometría, sólo topología; no hay fuerzas, no hay métrica, sólo la noción de continuidad ...

## 5. La situación actual

Se podría decir que en la investigación sobre partículas estamos en una situación parecida a la de fines del siglo pasado; en ambos periodos se detecta un cierto sentido ingenuo de complacencia debido a la escasez de datos

experimentales apropiados: los nuevos datos que probasen los aspectos críticos de nuestra teoría actual tendrían que aparecer en una región para la que no hay facilidades experimentales disponibles y la máquina capaz de alcanzar esa región está todavía en discusión*. Si alguna de las brillantes ideas concebidas desde 1975, como supersimetría, tecnicolor, partículas compuestas, etc., o la comprensión de los mecanismos de ruptura fueran posibles, sólo pueden ser *testadas* en el Supercolisionador Superconductor (llamado SSC, *Superconducting Supercollider*), el cual alcanzará 40 Tev de energía en el centro de masas algo después del año 2.000*. Es muy desafortunado que ahora que se ha logrado un consenso entre los teóricos en esperar la aparición de nuevos fenómenos alrededor de la región del Tev (quizá la escala de aparición de la supersimetría), los americanos estén pensando en abandonar el proyecto del SSC quizá para siempre*...

Algunos *test* del modelo *standard* ni siquiera se podrían hacer con el SSC; la escala de gran unificación ocurre a $10^{14}$ Gev, mucho más allá de la energía de los aceleradores actuales o futuros. Así, esas teorías sólo se pueden comprobar indirectamente, por ejemplo determinando el punto de intersección de las constantes de acoplamiento, observando la desintegración del protón, etc.

Pero persisten algunos de los misterios del modelo *standard* que nos perturban. ¿Pesan los neutrinos?* ¿Se mezclan unos con otros?* ¿Hay un sólo monopolo, que ya ha sido visto? (Cabrera, día de San Valentín, 14-II-1982 !! [29]). ¿De donde obtiene el protón su spin? De acuerdo, hemos encontrado el quark *top* a 137 Gev*, pero ¿donde está *la partícula divina* (alusión al reciente libro de L. Lederman [30]), el bosón Higgs?* ¿Cuantos Higgs hay?

Confiemos que los nuevos Plancks, Einsteins y Bohrs que aparecerán, es de suponer, en el siglo XXI, nos ayuden a resolver estos enigmas.

## ADDENDUM, NOVIEMBRE 1996

Hasta aquí en esencia la ponencia presentada en Agosto de 1993. La situación a finales de 1996 está algo cambiada. En *fenomenología* se ha encontrado por fin el último *quark*, el top, en Abril de 1995 [31], a una energía muy alta (unos 175 Gev; la previsión en 1993 era unos 140 Gev; en el texto jugamos con el número *137 Gev* por su especial significación teórica, pues (1/137) es la constante de estructura fina). No se ha encontrado aún el bosón de Higgs, pero se ha acotado teóricamente su masa y ahora creemos que pesará entre 100 y 300 Gev. No se ha observado la desintegración del protón ni se entiende mejor la violación de la simetría CP, aunque sus parámetros,

que forman parte de la matriz de Cabbibo-Kobayashi-Maskawa, se han precisado bastante empíricamente. Los experimentos con neutrinos parecen converger hacia una masa no nula de al menos dos ellos y una cierta mezcla entre los mismos. No hay huella aún de la supersimetría, pero los argumentos a favor de la misma son cada vez más compelentes; hay un consenso en ciertos círculos sobre que *Susy* está *a la vuelta de la esquina.*

En otras palabras, el *modelo standard* sigue siendo válido, no se han encontrado desacuerdos experimentales, pero sigue igual de arbitrario y poco estético. Desgraciadamente, los pronósticos negativos sobre el acelerador SSC se han confirmado, y el Congreso norteamericano cortó definitivamente el proyecto en noviembre de 1993, cuando ya se habían excavado 20 kilómetros de túnel a doscientos metros bajo la pradera de Tejas, al sur de Dallas.

En *astrofísica* hay también algunos avances dignos de mención. La radiación de fondo aparece anisótropa en la escala de la millonésima [32], lo que podría ser la *siembra* para la formación de estructuras, en particular las galaxias, uno de los grandes enigmas de la cosmología actual. Por lo demás, se confirma el modelo del *big bang* inflacionario. Los astrónomos concurren en que la mayor parte de la masa del Universo es invisible y ciertas cotas se establecen para esa *materia oscura.*

Pero lo más sabroso es otra *revolución teórica* que estamos experimentando, primero en teoría de campos (desde 1994) y después en teoría de cuerdas (1995), y de la que de nuevo el gran campeón es Ed Witten. La revolución va con el nombre de *dualidad...* Desde la dualidad de Poincaré en geometría diferencial, pasando por la dualidad electricidad-magnetismo o la más moderna de partícula fundamental-solitón, había ya varios antecedentes de dualidad en física. El gran avance de Seiberg y Witten [33] ha sido establecer una dualidad efectiva en una teoría cuántica de campos con supersimetría doble (se dice N = 2) entre los solitones, que son aquí monopolos magnéticos, y los bosones de *gauge*, con inversión de la constante de acoplamiento, de modo que lo que es acoplamiento fuerte en una fase es interacción débil en la visión dual y, por tanto, tratable perturbativamente. Consecuencia de ello, la teoría es confinante, es decir, un sector de monopolos sin masa produce en el plasma una situación análoga a la superconductividad, jugando el condensado de monopolos el papel de los pares de Cooper. El equivalente al efecto Meissner (diamagnetismo perfecto) corresponde por dualidad al confinamiento (campo cromoeléctrico restringido a filamentos lineares que producen un potencial lineal confinante).

La teoría no es realista aún, pues nuestra cromodinámica cuántica no es manifiestamente supersimétrica; pero son grandes las esperanzas de que

realmente hayamos encontrado el mecanismo correcto del confinamiento de los *quarks*; por cierto que un mecanismo esencialmente análogo, basado en la dualidad eléctrico-magnética fue ya imaginado por 't Hooft y Mandelstam en 1975 [34]. También se ilumina el problema de la simetría quiral y su rotura, rasgo conspicuo de la cromodinámica cuántica cuyo origen era algo enigmático.

Los avances debidos a la dualidad en la *teoría de supercuerdas* son espectaculares, aunque todavía están muy lejos de la realidad experimentable. Así, hasta el año pasado se pensaba que existían cinco teorías de supercuerdas posibles, con una de ellas, la llamada cuerda heterótica, que aunque era bien fea era la candidata a realizarse en la naturaleza; ahora sabemos (Polchinski, Schwarz, Witten, Duff...) que no, que las cinco teorías antiguas son sólo aspectos parciales de *la* teoría, un nuevo constructo que las abrazaría todas, que no se conoce bien y que se ha bautizado como la *Teoría M;* según los gustos, M quiere decir Magic, Master, Mythic, Matrix, etc. [35]. En esta concepción unitaria los solitones cordales juegan un papel preponderante (antes dijimos que en campos ya se conocía la dualidad partícula-solitón); es el caso que los solitones en teoría de cuerdas pueden ser membranas, agujeros negros, membranas de Dirichlet y otras faunas del bestiario teórico. Es especialmente satisfactorio que Vafa y Strominger [36] hayan podido determinar la entropía de los agujeros negros, un problema teórico pendiente desde hace veinte años.

De nuevo se vuelve a hablar de *la teoría del todo*; el autor no quisiera contagiar al lector de su entusiasmo, pero la teoría que se está fraguando en estos meses es ciertamente interesantísima y existe una gran excitación entre los científicos que siguen estos desarrollos. La nueva *teoría* contiene a la relatividad general, la mecánica cuántica, los campos de Yang y Mills, la supersimetría, las cuerdas y membranas, monopolos magnéticos y otros solitones, etc. Incluye un *nuevo principio de incertidumbre* que incorpora una longitud elemental, la longitud de Plank, lo que mejora ciertos aspectos epistemológicos de la mecánica cuántica. Uno de sus mayores atractivos es la *exclusividad*: la teoría NO posee parámetro arbitrario alguno y es por tanto única; o bien se adecua a los resultados experimentales actuales o habrá que rechazarla en su totalidad, quedando entonces la física teórica en la nada envidiable situación de tener que recomenzarlo todo, desde la teoría cuántica a la gravitación... y no es tan fácil presentar alternativas a las teorías actuales.

Terminamos aquí nuestra exposición, dejando a la física del futuro que decida por nosotros si estamos acercándonos al *fin de la aventura* o es otra ilusión miope más, muy típica de esta situación *fin du siècle*.

## BIBLIOGRAFIA

[1] WEINBERG, S. (1967) "A Model of Leptons". *Phys. Rev. Lett., 19,* 1264-1266.

[2] FRITZSCH, H. y GELL-MANN, M. (1973) "Current Algebra: Quarks and what else?". En: *Proc. XVI Int. Conf. High Ener. Phys. Chicago, 1972. Nat. Acc. Lab. Publ.* vol. 2, 135-165.

[3] GEORGI, H. y GLASHOW, S. L. (1974) "Unity of all elementary-particle forces". *Phys. Rev. Lett., 32,* 438-441.

[4] GEORGI, H., QUINN, H.R., y WEINBERG, S. (1974) "Hierarchy of interactions in unified gauge theories". *Phys. Rev. Lett., 33,* 451-454.

[5] GROSS D.J. y WILCZEK, F. (1973) "Ultraviolet Behaviour of Non-Abelian Gauge Theories". *Phys. Rev. Lett., 30,* 1343-1345.

[6] QUIGG, C. (1983) *Gauge Theories of the Strong, Weak, and Electromagnetic Interactions.* Reading (MA), Addison Wesley.

[7] WESS, J. y ZUMINO, B. (1974) "Supergauge Transformations in Four Dimensions". *Nucl. Phys., B70,* 39-50.

[8] CREMMER, E. y SCHERK, J. (1976) "Spontaneous Compactification of Space in an Einstein-Yang-Mills-Higgs Model". *Nucl. Phys., B108,* 409-416.

[9] SUSSKIND, L. (1979) "Dynamics of spontaneous symmetry breaking in the Weinberg-Salam theory". *Phys. Rev., D 20,* 2619-2625.

[10] HARARI, H. (1979) "A schematic model of quarks and leptons". *Phys. Lett., 86B,* 83-86.

[11] PECCEI, R.D. y QUINN, H.R. (1977) "Constraints imposed by CP conservation in the presence of pseudoparticles". *Phys. Rev., D16,* 1791-1797.

[12] `t HOOFT, G. (1976) "Symmetry Breaking through Bell-Jackiw Anomalies". *Phys. Rev. Lett., 37,* 8-11.

[13] WEINGARTEN, D. (1994) "QCD Spectroscopy". En: *Proc. Int. Symp. on Lattice Field Theory,* Dallas (TX) 1993. *Nucl. Phys., B (Proc. Suppl) 34,* 29-46.

[14] ARNISON, G. *et al.* (1983) "Experimental observation of isolated large transverse energy electrons with associated missing energy at $s^{1/2}$ = 540 GeV". *Phys. Lett., 122B,*103-105.

[15] KOLB, E.W. y TURNER, M.S. (1990) *The Early Universe.* Reading (MA), Addison-Wesley.

[16] YANG, C.N. y WU, T.T. (1975) "Concept of nonintegrable phase factors and global formulation of gauge fields". *Phys. Rev., D 12,* 3845-3857.

[17] ATIYAH, M.F., HITCHIN, N.J. y SINGER, I.M. (1977) "Deformation of Instantons". *Proc. Nat. Acad. USA, 74,* 2662-2663.

[18] Los más de 100 trabajos de Witten publicados entre 1978-92 han batido un record de citaciones. Entre los más importantes podríamos señalar:

(1) (1982) "Constraints on Supersymmetric Breaking". *Nucl. Phys., B 202,* 253-316,

(2) (1982) "Supersymmetry and Morse theory". *Jour. Diff. Geom., 17,* 661-690.

(3) (1983) "Gravitational Anomalies" (con L. Alvarez-Gaumé). *Nuclear Physics, B234,* 269-330.

(4) (1984) "Non-Abelian Bosonization in Two Dimensions". *Commun. Math. Phys., 92,* 455-472.
(5) (1985) "Symmetry Breaking Pattern in Superstring Models". *Nucl. Phys., B258,* 75-100.
(6) (1986) "Physics and Geometry". *Proc. Int. Cong. Maths.* Berkeley, Aug.
(7) (1988) "Topological Quantum Field Theory". *Comm. Math. Phys., 117,* 253-386.

[19] DIRAC, P.A.M. (1926) "On the Theory of Quantum Mechanics". *Proc. Roy. Soc., A 112,* 661-677.

[20] DIRAC, P.A.M. (1931) "Quantised Singularities in the Electromagnetic Field". *Proc. Roy. Soc., A 133,* 60-64.

[21] DRINFELD, V.G. (1986) "Quantum Groups". En: *Proc. Int. Cong. Maths.*. Berkeley (CA), AMS Publ., 1, 798-817.

[22] GARDNER, C.S. *et al.* (1967) "Method for solving the Korteweg-de Vries equation". *Phys. Rev. Lett., 19,* 1095-1097.

[23] LAX, P.D. (1968) "Integral of nonlinear equations of evolution and solitary waves". *Com. Pur. Appl. Maths., 21,* 467-490.

[24] BELAVIN, A.A., POLIAKOV, A.M. y ZAMALODCHIKOV, A.B. (1984) "Infinite Conformal Symmetry in Two-Dimensional Quantum F. Theory". *Nucl. Phys., B241,* 333-380.

[25] CREMMER, E., JULIA, B. y SCHERK, J. (1978) "Supergravity Theory in 11 dimensions". *Phys. Lett., 76B,* 409-412.

[26] GREEN, M.B. y SCHWARTZ, J.H. (1984) "Anomaly cancellations in supersymmetric D = 10 gauge theory and superstring theory". *Phys. Lett., 149B,* 117-120.

[27] GREEN, M.B., SCHWARZ, J. H. y WITTEN, E. (1987) *Superstring Theory.* Cambrigde (U.K.), Camb. Univ. Press.

[28] ATIYAH, M. (1987) "New Invariants in Three and Four Dimension Manifolds". En: *The Mathematical Inheritage of Hermann Weyl.* Univ. North Caroline, R. Wells Ed.

[29] CABRERA, B. (1982) "First Results from Superconductive Detector for Moving Magnetic Monopoles". *Phys. Rev. Lett., 48,* 1378-1384.

[30] LEDERMAN, L. (1993) *The God Particle.* New York, Delta Publ.

[31] ABACHI, S. *et al.* (1995) (D0 coll., 400 firmantes) "Top quark search with the D0 1992-1993 Data Sample". *Phys. Rev., D 52,* 4877-4919.

[32] SMOOT, G.F. *et al.* (1992) "Structure in the COBE Differential Microwave Radiometer first-year Maps". *Astrophys. Jour., 396,* L1-L5.

[33] SEIBERG, N. y WITTEN, E. (1994) "Monopoles, duality and chiral symmetry breaking in N = 2 supersymmetric QCD". *Nucl. Phys., B 431,* 484-550.

[34] 't HOOFT, G. (1975) "Gauge Theories with Unified Weak, Electromagnetic and Strong Interactions". En: A. Zichichi (ed.), *Proc. EPS Int. Conf. Palermo (Italy).* Bologna, Edit. Compos.

MANDELSTAM, S. (1976) "Vortices and Quark confinement in non-Abelian gauge theories". En: *Proc. ENS Meeting, Paris (France) 1975; Phys. Rep., 23C,* 245-249.

[35] DUFF, M. "M-Theory (The Theory Formerly Known as Strings)". *Internet www.lanl.gov.// hep-th 96.08.117 (19-Aug-96).*

[36] STROMINGER, A. y VAFA, C. (1996) "Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy". *Phys. Lett., B379,* 99-104.