

El Modelo Quark (I)

Introducción Histórica

Por Rubén Sánchez-Ramírez

1. El periodo semiclásico

1.1. Los constituyentes del átomo

La física de partículas elementales, tal como la conocemos hoy día, comienza en 1887 con el descubrimiento del electrón por J.J. Thomson, quien estableció para el átomo el modelo del "pastel de pasas", donde el bizcocho constituiría la mayor parte de la masa y estaría cargado positivamente, mientras los electrones-pasas se distribuirían uniformemente en el volumen del pastel para garantizar la neutralidad del átomo.

En 1911 Rutherford y Geiger (entonces su estudiante de doctorado) construyeron un dispositivo con el que demostraron que la carga positiva se concentraba en un núcleo mucho más pequeño que el átomo, invalidando el modelo de Thomson. Al núcleo del hidrógeno lo llamaron protón.

En 1914 Niels Bohr propuso su famoso modelo planetario para el átomo de H, obteniendo buenos resultados para éste pero fallando para el He y más pesados.

En 1932 Chadwick descubre una nueva partícula con carga eléctrica neutra y masa parecida a la del protón y a partir de entonces el universo parecía poder explicarse de manera satisfactoria en términos de tres partículas: el electrón, el protón y el neutrón. Fue el apogeo de una "belle époque", que por supuesto no duró demasiado.

1.2. El fotón

Contrariamente a lo que sucedió con otras partículas, el fotón no fue descubierto por un experimento dedicado, ni su existencia postulada por una teoría formal. Fue un concepto introducido por Planck en 1900 para explicar el espectro de la radiación del cuerpo negro, aunque entonces ni él mismo creyó en su existencia física.

En 1905 Einstein consigue explicar el efecto fotoeléctrico usando la idea de Planck, otorgándosele más tarde el premio Nóbel por ello. Pero no fue hasta 1932 cuando A.H. Compton demostró su existencia mediante un experimento de dispersión de rayos X por electrones en un blanco de carbón.

2. Física de partículas en el paradigma de la física actual

2.1. La antimateria

En 1927 P.A.M. Dirac presentó la famosa ecuación que lleva su nombre, la cual compatibiliza la ecuación de ondas con la relatividad especial y establece la existencia de soluciones con energía negativa. Su brillante interpretación fue asociar dichas soluciones a la existencia de antipartículas, hecho confirmado en 1931 por Anderson tras el descubrimiento del positrón. De hecho, la ecuación de Dirac pone de manifiesto una propiedad universal de la naturaleza: la existencia, para cada partícula, de su antipartícula con todas sus cargas opuestas. En 1955 fueron descubiertos el antiprotón y el antineutrón en el Bevatron de Berkeley (figura 1.3).

2.2. Los mesones

Un problema que el modelo de Bohr ignora es el de la estabilidad del núcleo atómico ante la repulsión electrostática de los protones en el núcleo. Debe existir una fuerza más intensa que la electromagnética que consiga mantener unidos los nucleones, que sea de corto alcance ya que no se detecta a distancias superiores al del radio nuclear y ser independiente de la carga eléctrica.

En 1934 H. Yukawa propuso la primera teoría cuantitativa de la fuerza nuclear fuerte postulando que los nucleones se atraen mutuamente por mediación de un campo de fuerza. Del mismo modo que es posible explicar el alcance infinito de la fuerza electromagnética en términos de una partícula intermediaria sin masa (el fotón), es posible inducir la masa de una partícula que media una fuerza de corto alcance. Yukawa estimó que la masa de dicha partícula, a la que llamó mesón, debía ser unas 300 veces superior a la del e^- .

En 1937, Street y Stevenson estudiaban rayos cósmicos en una cámara de niebla cuando descubrieron una partícula penetrante cuya masa coincidía bien con la predicha por la teoría de Yukawa, asociándose originalmente a ésta. Sin embargo poco después se descubriría una segunda partícula, provocando una considerable confusión respecto a la naturaleza de los entonces denominados mesón- μ (muón) y mesón- π (pión). Finalmente, una serie de experimentos establecieron que el pión era la partícula predicha por Yukawa y que el muón era una versión pesada (un factor de aproximadamente 200) del e^- , lo que no tranquilizó en absoluto los ánimos ya que nadie se explicaba la razón de su existencia.

2.3. El neutrino

En 1930 los físicos se enfrentaban con una paradoja surgida estudiando la llamada desintegración β de cierto núcleo radiactivo A que se transforma

$$A \rightarrow B + e^- \quad (1.1)$$

En una desintegración a dos cuerpos, por conservación de energía-momento, la energía del electrón emitido es

$$E = \frac{m_A^2 - m_B^2 + m_{e^-}^2}{2m_A} \quad (1.2)$$

por lo que la energía del electrón siempre debe ser la misma. No obstante el espectro medido en las desintegraciones no es monocromático sino continuo, cuya energía máxima viene dada precisamente por 1.2. Para poder explicar esto es necesario introducir una nueva partícula n que transporte la energía que no ha tomado el e^- . El problema era que dicha partícula era un fantasma, luego era necesario que fuera neutra (la carga se conservaba), con masa muy ligera o nula y

que no interaccionase de manera apreciable con la materia. Fue W. Pauli quien predijo la existencia del neutrino a su pesar, tal como muestra su célebre carta a los participantes en la conferencia de Tübingen:

"Queridas damas y caballeros radioactivos (...). He dado con un remedio desesperado (...) a fin de salvar las leyes de conservación de energía (...) esto es la posibilidad de la existencia en el núcleo atómico de partículas neutras (...) que llamaré neutrones¹"

En 1934 E. Fermi propuso la primera teoría cuantitativa de la desintegración beta, estableciendo que el proceso es



y no fue hasta 1956 cuando F. Reines y C. Cowan realizaron su histórico experimento en el que observaron por primera vez la interacción de un antineutrino.

Ya en 1953, antes de detectarse el neutrino, los físicos se preguntaban si había solo un tipo, el que se emite en la desintegración beta, o si existía un segundo tipo, asociado a la desintegración del pión en un muón, que posteriormente decae en un e^{-} . La respuesta la dieron Swartz, Lederman, Steinberger y colaboradores en 1963 produciendo el primer haz de neutrinos muónicos de la historia.

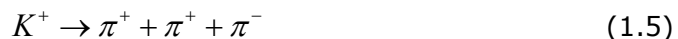
Existe además un tercer neutrino asociado a la partícula τ , descubierta en SLAC (1975) por M. Perl y colaboradores, quien recibió por ello el premio Nóbel de física.

2.4. La extrañeza

Hacia 1947, y no por primera vez, los físicos opinaban que su disciplina estaba casi cerrada. El mundo estaba compuesto por protones, neutrones, electrones y sus antipartículas. Además, más o menos a regañadientes se aceptaba al muón y su neutrino. En diciembre de ese año, sin embargo, la fotografía mostrada en la figura 1.4 acaba de nuevo con la tregua. El análisis muestra la existencia de una partícula neutra que se desintegra en un par de piones cargados y de signo opuesto



En 1949, Powell descubrió el kaón cargado a partir de la desintegración



y a partir de entonces empezaron a proliferar este tipo de partículas (mesones) hasta tal punto que W. Lamb, Nóbel de física en 1953, llegó a afirmar (supuestamente en broma) que "Hace poco tiempo, al descubridor de una nueva partícula se le daba un premio Nóbel... ¡¡Hoy en día se le tendría que poner una multa!!"

En 1950, Anderson y colaboradores encontraron otra partícula pesada y neutra, la lambda, a partir de la desintegración



¹Posteriormente, Chadwick se apropió del nombre originalmente propuesto por Pauli para denominar al nucleón neutro. Los fantasmas de Pauli fueron bautizados finalmente por E. Fermi con el nombre de neutrinos

partícula que esta vez pertenece a la familia de los bariones, de la cual el protón es la más ligera. Al igual que ocurrió con los mesones, la proliferación incontrolada de este tipo de partículas no se hizo esperar.

Hacia 1952, cuando entró en funcionamiento el primer acelerador de partículas (figura 1.3) se observó que las partículas antes mencionadas, a las que entonces se les llamó *partículas extrañas* debido a la confusión reinante sobre su naturaleza, se producían copiosamente entre los productos resultantes de las colisiones. Otro aspecto extraño era su "larga" vida media (10^{-10} s, a comparar con los 10^{-23} s necesarios para producirlas). A. Pais y otros sugirieron que esa discrepancia sólo podía explicarse si el mecanismo de producción y desintegración eran completamente diferentes, como más tarde se comprobó. Se observó además que estas partículas extrañas se producían en pares. En 1953, Gell-Mann y Nishima introdujeron un nuevo número cuántico, la extrañeza, con la peculiaridad de que se conserva en las interacciones fuertes pero se viola en las débiles.

En la década de los 60 los físicos sabían producir innumerables partículas "elementales", pero nadie sabía cómo extraer orden del aparente caos que se observaba en los datos.



Figura 1.1: Anderson junto al instrumental empleado en sus experimentos.

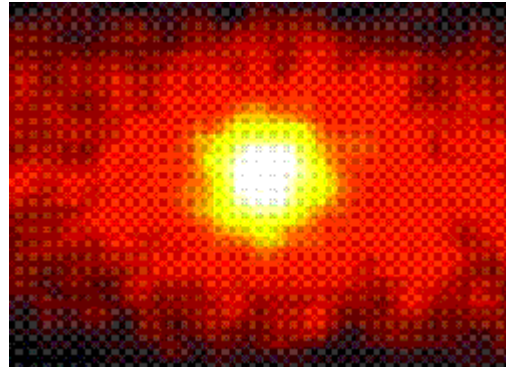


Figura 1.2: El Sol, visto en "el rango del neutrino".



Figura 1.3: El primer acelerador de partículas de la historia, el Cosmotrón de Brookhaven, capaz de acelerar protones hasta energías de unos pocos GeV (Para el LHC hablamos de unos pocos TeV).

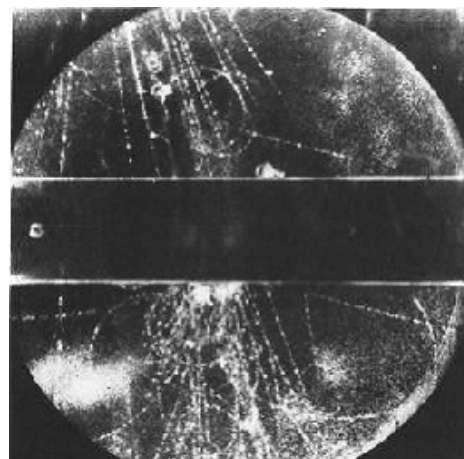


Figura 1.4: Descubrimiento del kaón neutral, en el vértice de la "V" invertida, correspondiente a las trazas de los piones cargados.

2.5. Los quarks

El primer paso que llevaría a Gell-Mann² al *modelo quark* y la explicación de la estructura interna de los hadrones consistió en organizar a los bariones y mesones en términos de su carga y su extrañeza, dándose cuenta de las curiosas figuras geométricas que aparecían al hacerlo. El descubrimiento de la partícula Ω^- a partir de la predicción obtenida de la figura 1.6 supuso la evidencia incontrovertible de que existía una estructura en los hadrones similar a la estructura de los elementos en la tabla periódica.

¿Cuál es esta estructura? La respuesta que dio Gell-Mann³ postulando que los hadrones están compuestos por quarks, dos ligeros, u (*up*) y d (*down*) a los que asignó extrañeza $S = 0$ y un quark más pesado, extraño s (*strange*), con $S = -1$. La carga eléctrica de d y s sería de $-1/3$ mientras que la de u sería $2/3$. Los antiquarks tienen valores opuestos. La combinación de estos quarks forman cada una de las partículas conocidas.

Inicialmente el modelo quark fue aceptado con enorme entusiasmo, pero pronto se plantearía un serio problema desde el punto de vista experimental, ya que tras casi 50 años de experimentos nadie a conseguido ver nunca un quark libre. Esta circunstancia, junto a que el modelo parecía violar el principio de exclusión de Pauli relegó a un segundo plano la idea hasta tal punto que cuando diversos experimentos realizados en SLAC y el CERN mostraron la evidencia de que el protón poseía una subestructura, los físicos denominaron a estos constituyentes *partones*, resistiéndose en un principio a asociarlos a los quarks de Gell-Mann.

Sin embargo hoy en día el modelo vuelve a gozar de buena salud. El comienzo de su resurrección fue en 1974, con el descubrimiento de la partícula J/Ψ de manera mas o menos simultánea en Brookhaven por S. Ting (J) y en SLAC por B. Richter (Ψ), mesón pesado eléctricamente neutro cuya largo tiempo de vida medio puede explicarse recurriendo de nuevo al modelo quark con un nuevo tipo de partícula elemental: el c (*charm*). Al descubrimiento del "charmonio" le siguió el de otras partículas con encanto.

En 1977 se descubrió la partícula γ , que resultó ser el estado ligado de un quinto quark b (*beauty*). Finalmente, en 1995 y tras una larga búsqueda, se encontró el último quark t (*top*) en Fermilab.

1.3. El modelo estándar

En su teoría de la desintegración beta, Fermi no consideró la mediación de ninguna partícula intermediaria de la fuerza débil, lo que provocaba que a altas energías el resultado divergiese. La predicción de las masas de los bosones W^+ , W^- y Z^0 la proporcionó la teoría electrodébil de Glashow, Weimberg y Salam, constituyendo a partir de entonces uno de los pilares del denominado modelo estándar, el cual define nuestra visión más actual de las partículas elementales y de las interacciones que las rigen.

²Ne'eman propuso un esquema similar de manera independiente

³También en este caso, Zweig propuso un esquema similar de manera independiente

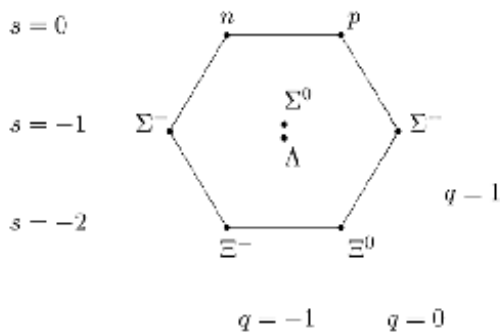


Figura 1.5: El octeto de bariones. Los ocho bariones más ligeros pueden organizarse en un hexágono con dos partículas en su centro.

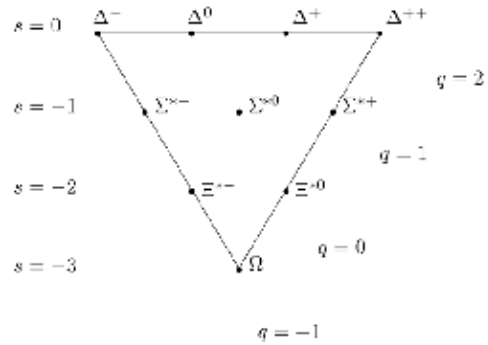


Figura 1.6: El decuplete de bariones. Diez bariones pesados se organizan en un triángulo.

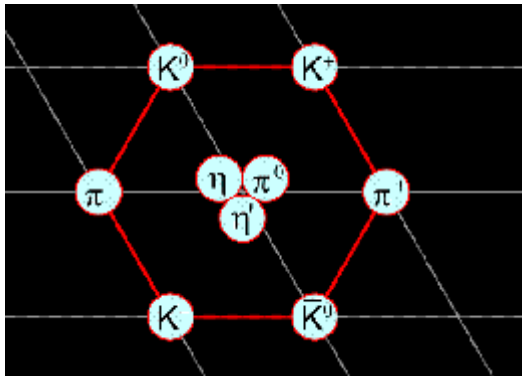


Figura 1.7: El "nonete" de mesones. Los nueve mesones más ligeros pueden disponerse en un hexágono con tres partículas en el centro.

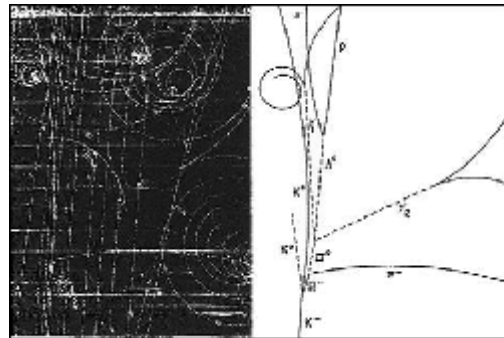


Figura 1.8: El descubrimiento de la partícula Ω^- en 1964



Figura 1.9: Vista aérea del Fermilab. El anillo en primer plano es el Inyector Principal y el anillo posterior es el Tevatrón, acelerador donde se descubrió el quark *top*.



Figura 1.10: El SLAC, ubicado al sur de San Francisco, acelera electrones y positrones a lo largo de algo más de tres kilómetros hacia varios blancos, anillos y detectores ubicados en su finalización. Este acelerador hace colisionar electrones y positrones, estudiando las partículas resultantes de estas colisiones.

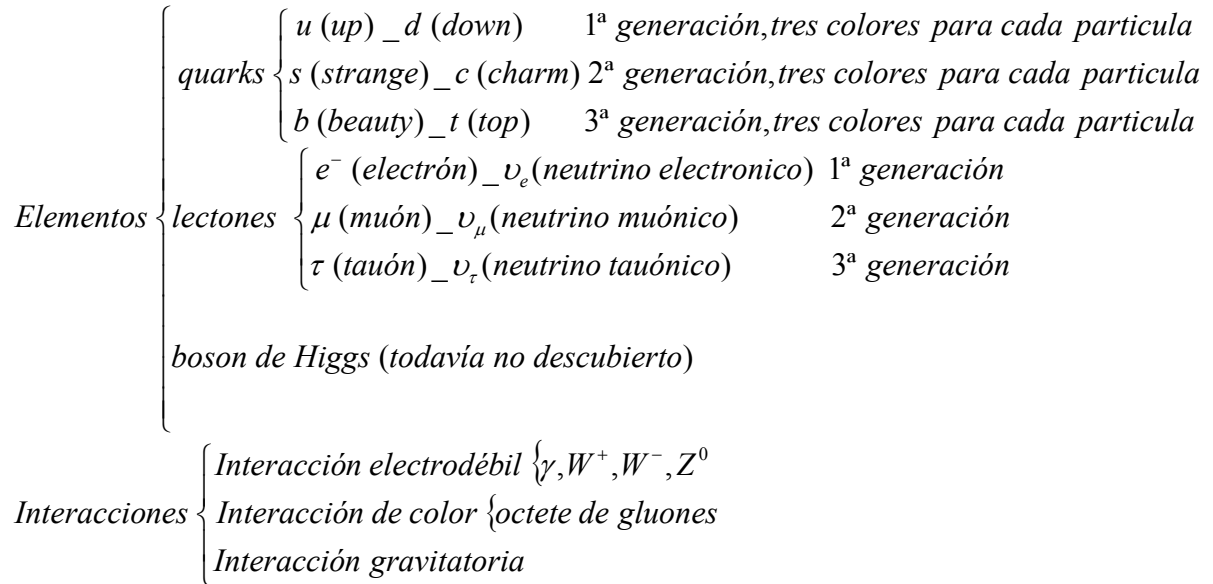
El modelo estándar presenta una descripción bastante elegante y simple de las interacciones: estas aparecen de manera natural como consecuencia de la simetría de los sistemas frente a un conjunto de transformaciones. Las propiedades de la interacción quedan completamente determinadas por el grupo de simetría y su intensidad viene dada por una o dos constantes.

También hay que tener presente que presenta una serie de limitaciones:

- No incluye la interacción gravitatoria.
- Continúa siendo de actualidad el problema de la masa de los neutrinos.

- El modelo contiene 17 parámetros arbitrarios, lo que hace que no alcance el estatus de teoría.

Modelo Estándar



Marco Teórico Teorías gauge locales



Figura 1.11: Representación algo informal de las partículas e interacciones del modelo estándar

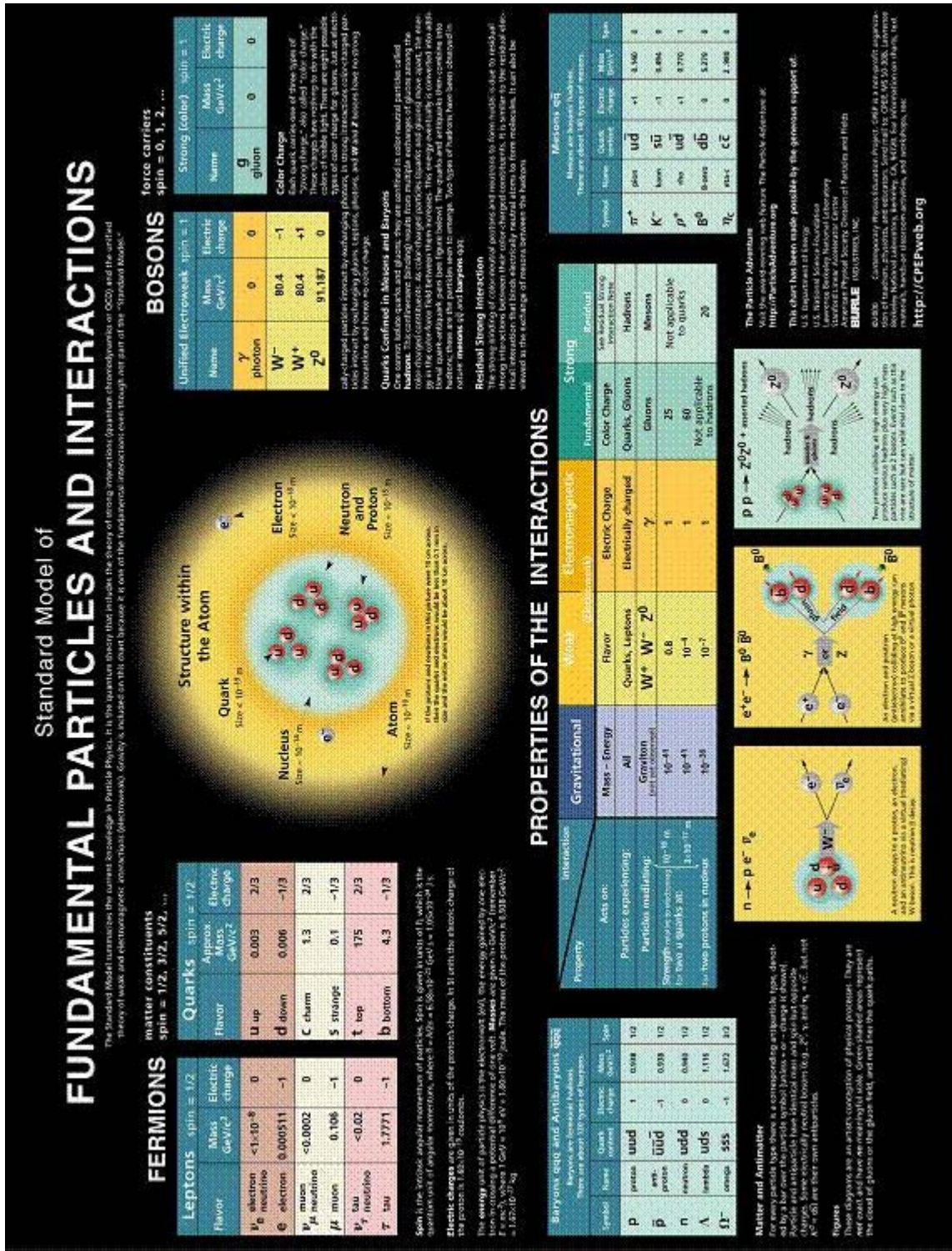


Figura 1.12: Póster donde se expone de manera esquemática las principales características del modelo estándar

Rubén SÁNCHEZ-RAMÉZ
Facultad de Física
Universidad de La Laguna

Este artículo es la primera parte de un total de cuatro, en donde el autor expone la estructura del Modelo Quark