

Enseñanza del Modelo Estándar: papiroflexia y rompecabezas de partículas fundamentales

Martha Ofelia Rivera Hernández
Beatriz Regalado Bautista
Jorge Luis Nájera Ochoa
 SECTEI

Resumen

El presente artículo tiene por objetivo mostrar a los docentes una estrategia para introducir a sus estudiantes de educación media superior a los conocimientos de vanguardia en el campo de la física de partículas, donde se reconocen algunas de las partículas descubiertas recientemente en el laboratorio más impresionante del mundo, el CERN (Centro Europeo para la Investigación Nuclear). Para ello, se propone realizar un móvil con las fuerzas fundamentales, unas figuras de papiroflexia para la construcción del núcleo y un rompecabezas para el Modelo Estándar, en los que conocerán las características e interacciones físicas de las partículas.

Palabras clave: Modelo Estándar, partículas fundamentales, enseñanza de la Física, estrategias didácticas

Se agradece al Dr. Salvador Carlos Cuevas Cardona su asesoría científica

Introducción

En el 2019 los Docentes Tutores Investigadores (DTI) de la academia de Física del Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México (IEMS, CDMX) fueron invitados por la Institución a concursar en el Programa para Profesores de Lengua Española del Centro Europeo para la Investigación Nuclear (CERN) en Ginebra, Suiza. La selección consistió en la valoración del currículo y una carta de exposición de motivos para asistir al programa, donde se plasmó cuáles serían nuestras contribuciones tras participar en él. Por primera vez en 19 años de funcionamiento del IEMS, una comisión de 12 DTI fueron aceptados y viajaron al Gran Acelerador de Hadrones; la segunda generación solo fue una DTI y en la tercera fueron 18 DTI entre los que se encontraban participantes de la academia de computación.

El compromiso al asistir al CERN fue actualizar a los DTI para enseñar ciencia de frontera en el aula y contribuir a la cultura científica e inspirar a los jóvenes a estudiar estos campos, especialmente la Física de Partículas. El reto ahora es pasar de enseñar Física Moderna de principios del siglo XX con un enfoque relativista y nuclear, donde por nuclear se ve al núcleo formado por protones y neutrones, a enseñar la Física del siglo XXI en términos de partículas fundamentales, donde los protones y neutrones ya no son partículas elementales, se ha descubierto que son divisibles y están formados por partículas más pequeñas, dos tipos de quarks y sus interacciones. El Modelo Estándar es la teoría contemporánea en que se basa la Física de Partículas y sus interacciones. (González y Santamaría, 2007).

¿Cómo llegamos al Modelo Estándar?

Los filósofos griegos para explicar la composición de la materia propusieron en concepto: "materiales elementales" de donde procede la idea del átomo. Pero la estructura de la materia era una idea y la luz, la electricidad y el magnetismo eran otras ideas diferentes que se desarrollaron por separado (Menchaca, 1995, pp. 13-14).

A principios del siglo XIX, Dalton determina que los compuestos químicos siempre se componen de masa de elementos en números enteros, con un pequeño excedente que se queda o no siempre reacciona. Así mismo, hace la observación de que los elementos tienen masas muy cer-

canas a múltiplos del hidrógeno, lo que lleva a formular, en 1815, a William Prout que todos los elementos químicos estaban formados por masas de números enteros múltiplos del átomo de hidrógeno. Al mismo tiempo, Faraday experimenta con la carga eléctrica y sin establecer un valor preciso, determina que se requiere de una cantidad específica para separar moléculas en sus elementos primordiales, manteniéndose siempre los mismos. Entre estos hallazgos y los de Avogadro, que se refieren a que las moléculas son la suma de los pesos atómicos de los elementos que la componen, se pudo predecir la fórmula química de muchos compuestos. De esta manera, a finales del siglo XIX se acepta la existencia del átomo (Menchaca, 1995, pp. 20-21).

Por otra parte, a principios del siglo XVIII, Newton y Huygens discrepan sobre la naturaleza de la luz, lo que abre la comprensión de esta a la dualidad onda-partícula de la luz. Pero no es sino hasta el siglo XIX cuando Maxwell propone que la luz es una onda electromagnética y en 1887 es Hertz quien lo comprueba (Menchaca, 1995, pp. 26-27).

Para el siglo XIX a esta naturaleza dual de la materia onda-partícula se le conoce como fotón, la partícula responsable del campo electromagnético sin masa, pero con la velocidad límite del universo. (Menchaca, 1995, pp. 4). La naturaleza ondulatoria de la luz, junto con el descubrimiento del electrón, muestran que el átomo es divisible, iniciando así la era de las partículas nucleares. Por otro lado, el protón, que refiere según su etimología griega a "el primero", fue utilizado para estudiar el núcleo y con ello la radioactividad. Sin embargo, los datos experimentales mostraban la existencia de una partícula masiva y sin carga, el neutrón (Menchaca, 1995, pp. 49-66).

Desde el siglo XIX, y hasta la actualidad, se ha buscado tener una comprensión e integración teórica tanto de las partículas elementales como de las interacciones o fuerzas fundamentales de la naturaleza (Electromagnética, Nuclear Fuerte, Nuclear Débil y Gravitacional). Dicha búsqueda de integración en un Modelo producto de la genialidad del trabajo de miles de científicos e ingenieros internacionales originó el llamado Modelo Estándar.

¿Para qué enseñar el Modelo Estándar?

El Modelo Estándar es una de las teorías más fascinantes de la física contemporánea, la cual ha permitido que científicos de todo el mundo comprendan de qué está hecho el universo. Sin embargo, aún queda por integrar en este modelo la Fuerza gravitacional y su partícula de interacción,

a la que algunos llaman *Gravitón* y lo asocian como una partícula fantasma.

Actualmente todos estamos bombardeados de conceptos que no se abordan en el aula, pero sí en películas, revistas, cómics, programas de televisión, entre otros, como es el caso del personaje animado *Buzz Lightyear*, que no sólo tiene un arma láser, sino que viaja en el tiempo, así como, *Zurg*, su padre, posee un arma de neutrones. Por lo que enseñar el Modelo Estándar en el aula, no sólo puede ser atractivo sino motivador para explorar, comprender y contextualizar los descubrimientos de frontera de las partículas subatómicas y sus interacciones en el mundo cotidiano.

La Física de partículas, orienta a cuestionar preguntas clave: ¿Cómo está constituido el universo?, ¿cómo se estructura y se constituye la materia?, ¿de qué manera las partículas forman parte del universo conocido, también del desconocido?

Esta serie de preguntas motiva a los estudiantes a comprobar las respuestas mediante el diálogo y la visualización de una imagen, y es en este punto donde el tema de Rompecabezas tiene sentido como ejercicio fundamental: el de armar ideas desde el aparente desorden.

Pilares del Modelo Estándar

La Mecánica Cuántica y la Relatividad General son los pilares teóricos que fundamentan la existencia de las nuevas partículas fundamentales. De la mecánica cuántica derivan: la Física de Partículas y el Modelo Estándar, mientras que, de la Relatividad General, derivan la Física del Espacio-tiempo y el Modelo Estándar Cosmológico (García, P. 2023). En este artículo nos centraremos en la primera.

¿Cómo funciona el núcleo a nivel subatómico?

A partir de partículas elementales muy pequeñas e indivisibles. Podemos imaginar bloques que al juntarse forman una estructura sólida o masiva, por ejemplo, los protones y neutrones, partículas del núcleo atómico o nucleones, están formadas por tres quarks cada una: dos *up* y un *down*; para el protón y dos *down* y un *up*; para el neutrón. Protones, neutrones y electrones, constituyen la materia que todos conocemos, formada por átomos.

Estrategia de aprendizaje 1. Modelo Papiroflexia del átomo

Elegir 2 figuras geométricas diferentes cualesquiera y 3 colores, para representar partículas elementales. Por ejemplo: un cubo azul representará la partícula elemental del electrón, que estará fuera del núcleo y orbitando, un pentágono amarillo representará un quark *down*; y otro pentágono anaranjado representará la partícula elemental del quark *up*. Los colores son arbitrarios. A cada figura geométrica se le describirán únicamente 3 características: carga, masa y *spin*, como se muestra en la Figura 1.

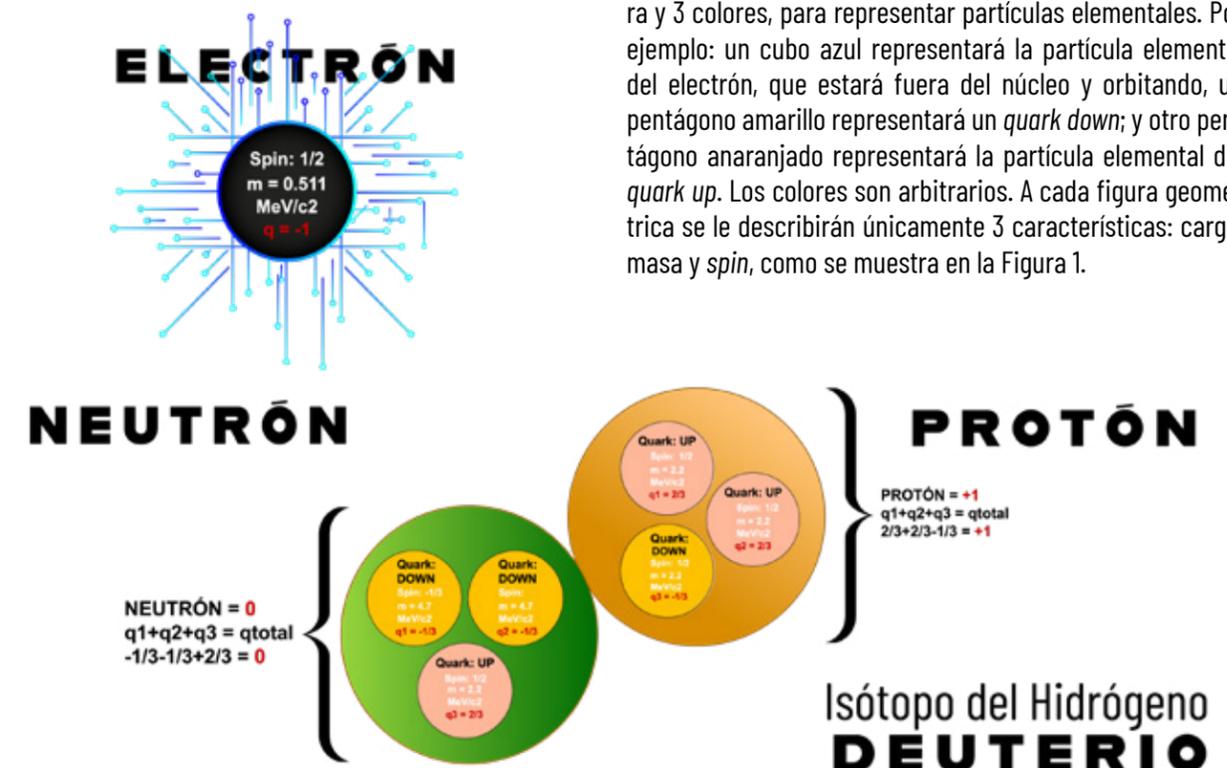


Figura 1. Estructura del Isótopo 2 del Hidrógeno, Deuterio. (Regalado, 2024)

Nota: Se muestra la información que se registra en cada figura geométrica y cómo se forma el isótopo 2 del Hidrógeno pesado o Deuterio.

Cada estudiante elabora las siete piezas de la Figura 1 para formar un átomo de Deuterio. En el aula muestran su modelo en papiroflexia, lo explican y entre todos forman otros átomos más pesados.

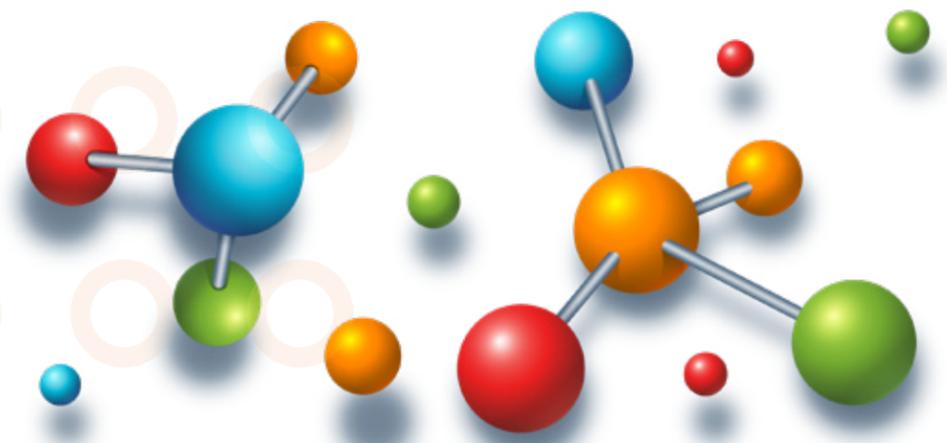
Pero ¿cómo se mantienen unidas las partículas elementales?

Las Fuerzas o Interacciones naturales son las responsables de mantener unidas a las partículas elementales para formar los átomos y sus interacciones a nivel macroscópico. En la Tabla 1 se describen las cuatro fuerzas fundamentales de la física que son responsables de todos los fenómenos del universo, explicada con partículas elementales.

Fuerza o Interacción	Descripción	Partículas Elementales de Interacción	Mediador o Intercambio, partículas elementales
1. Electromagnética	Es la responsable de las interacciones entre partículas con carga eléctrica. Responsable de las reacciones químicas.	Fermiones: electrones y quarks.	BOSONES: Fotones, partículas sin masa de intercambio electromagnético.
2. Nuclear Fuerte	Es la responsable de la interacción entre nucleones (protones y neutrones), de mantenerlos unidos y por lo tanto de la estabilidad de la materia.	Fermiones: quark con carga de color.	BOSONES: Gluones, partículas con masa
3. Nuclear Débil	Es responsable de las partículas inestables que decaen en otras más ligeras, es decir, de la radioactividad	FERMIONES: quarks y neutrinos, entre otros más BOSONES: Bosones W y Z	BOSONES
4. Gravitacional	Es la responsable de la configuración a escala MACROSCÓPICA del universo y de su estabilidad.	Todas las partículas con masa: quarks, electrones, neutrinos y los BOSONES con masa como el gluón y los BOSONES W y Z.	Gravitón (aún no se ha observado experimentalmente y su existencia es un tema de investigación activa).

Tabla 1. Las cuatro Fuerzas o Interacciones fundamentales de la Física. (Román, 1997)

Nota: En esta tabla se muestran las cuatro fuerzas naturales en la primera columna; en la segunda está su descripción; y en la tercera se encuentra la información sobre las partículas elementales que interaccionan con cada una de las Fuerzas fundamentales; la cuarta columna muestra la partícula elemental que intercambian en dicha interacción. (Román, 1997).



Estrategia de aprendizaje 2: Modelo de Fuerzas fundamentales

La segunda actividad a realizar por parte de los estudiantes es un móvil con material reciclable sobre las características de las Fuerzas fundamentales realizado con la información de la Tabla 1. El objetivo es identificar las partículas de intercambio en cada fuerza o interacción y que cada fuerza tiene un mediador, que también es una partícula elemental. Así en cada interacción se intercambia masa o energía. En el caso de la Fuerza Gravitacional ésta interacciona con todas las partículas elementales con masa, que al ser una Fuerza natural debería tener un mediador, el cual aún no ha sido descubierto y por lo tanto es común representarlo como un fantasma (Román, 1997). Einstein además de estudiar la relatividad, buscaba una teoría de la unificación de las Fuerzas fundamentales, pero nunca tuvo éxito; otro intento en este sentido, es el trabajo realizado por muchos científicos sobre la Teoría de cuerdas, pero igualmente, nadie ha logrado la unificación aún.



Figura 2. Esquema general del Modelo Estándar (Regalado, 2024)

Nota: En la figura se presentan las 16 partículas elementales y su principal clasificación en Fermiones y Bosones.

Estrategia de aprendizaje 3: Modelo Rompecabezas de partículas elementales

Se trata de Investigar la Tabla 2 de las nuevas partículas.

Modelo estándar de física de partículas

las tres generaciones de la materia (fermiones)			interacciones / transmisores de fuerzas (bosones)		
	I	II	III		
masa	$\approx 2.16 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.2730 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 172.57 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.20 \text{ GeV}/c^2$
carga	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
espín	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u cuark arriba	c cuark encantado	t cuark cima	g gluon	H bosón de Higgs
CUARKS	$\approx 4.70 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d cuark abajo	$\approx 93.5 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s cuark extraño	$\approx 4.183 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b cuark fondo	0 0 1 γ fotón	
	$\approx 0.5110 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electrón	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$\approx 1776.93 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tauón	$\approx 91.1880 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z bosón Z	
LEPTONES	$< 0.8 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino electrónico	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muónico	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauónico	$\approx 80.3692 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W bosón W	BOSONES DE GAUGE BOSONES VECTORIALES
					BOSONES ESCALARES

Tabla 2. Modelo Estándar de física de partículas (CPAN Ingenio, 2010)

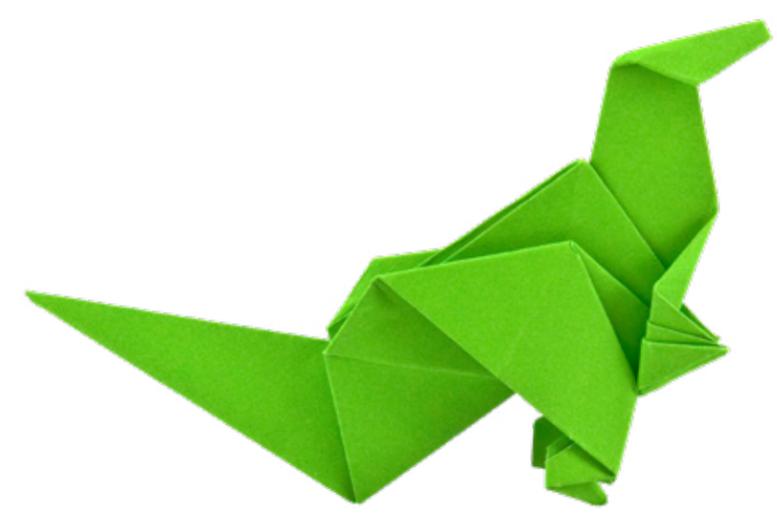
Nota: (Adaptación del original) De color morado y verde observamos a los Fermiones con sus antipartículas y que no se sujetan al Principio de exclusión de Pauli, por lo que dos partículas sí pueden ocupar el mismo estado cuántico. En anaranjado se muestran los Bosones que no tienen antipartículas y sí se sujetan al Principio de exclusión de Pauli, por lo que dos partículas no pueden ocupar el mismo estado cuántico. En amarillo el Bosón de Higgs, recién descubierto.

Construcción del rompecabezas de física de partículas

Con la Tabla 2 se construye un rompecabezas del Modelo Estándar en forma plana o volumétrica con material reciclable o reciclado. Éste será el material para repasar jugando en clase con las características de las partículas elementales. Se trabaja por parejas e intercambiando con los compañeros de la clase los rompecabezas para reafirmar el análisis de la tabla del Modelo Estándar. Desde el punto de vista pedagógico, se busca fortalecer la interpretación de la figura del observador.

A manera de cierre

La construcción de estos modelos es un primer acercamiento de los estudiantes al conocimiento relacionado con la Física de Partículas. Las estrategias docentes buscan integrar y despertar la curiosidad científica en jóvenes estudiantes, por conocer sus propiedades, que de ninguna manera son de fácil comprensión, por lo que el siguiente paso es guiarlos a investigar sobre aplicaciones del modelo estándar para despertar en ellos el interés por la ciencia y así busquen una comprensión más allá del átomo (los *quarks*) y del cómo el universo está constituido por partículas elementales y sus aplicaciones.



Referencias

- Centro Nacional de Física de Partículas, Astropartículas y Nuclear (CPAN) (2010). El Modelo Estándar de la Física de Partículas. *CPAN Ingenio*. <https://www.icpan.es/es/content/el-modelo-est%C3%A1ndar-de-la-f%C3%ADsica-de-part%C3%ADculas>
- García, P. (26 de junio de 2023). *Física Fundamental* [Ponencia]. Programa para profesores de lengua española del CERN, Suiza. <https://indico.cern.ch/event/1200942/contributions/5453737/>
- González, N. F. y Santamaría, D. P. (2007). La importancia de las interacciones fundamentales. *Góndola, Enseñanza y aprendizaje de las Ciencias*, 2(1), 67-71. <https://doi.org/10.14483/23464712.5314>
- Menchaca, A. (1995). *El discreto encanto de las partículas elementales*. Fondo de Cultura Económica. <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/068/htm/discreto.htm>
- Román Roy, N. (1997). Sobre las interacciones fundamentales, las partículas elementales y la teoría de campos. *Buran*, (9), 41-44. <https://raco.cat/index.php/Buran/article/view/176846>

Fichas de autoras y de autor

Martha Ofelia Rivera Hernández

martha.rivera@lems.edu.mx

Física por la Universidad Autónoma de Baja California. Maestra en Ciencias en Óptica por el Centro de Investigaciones Científicas y de Educación Superior de Ensenada. Docencia en la: Universidad Autónoma de Baja California del 1991 al 2000, Centro de Enseñanza Técnico y Superior; CETYS Universidad en 2000, Facultad de Ingeniería; UNAM en 2005, Docente Tutora Investigadora de tiempo completo en la academia de Física en el Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México del 2005 a la fecha.

Beatriz Regalado Bautista

beatriz.regalado@iems.edu.mx

Ingeniera en energía por la UAM-I. Trabajó como consultora de ahorro de la energía en iluminación e implementación del proyecto en el IPN en 1993. Trabajó en el Grupo Industrial Resistol S.A. (GIRSA) como administradora de proyectos en la Gerencia de procesos, Ahorro de Energía Propiedad Industrial de 1996 a 1999. En 1999 a 2001 fue responsable de la propiedad industrial en el CID, Centro de Investigación y Desarrollo de GIRSA. Desde 2005 es DTI en Física en el IEMS CDMX.

Jorge Luis Nájera Ochoa

jorge.najera@lems.edu.mx

Cursó la Licenciatura en Física en la Facultad de Ciencias de la UNAM. Tiene una maestría en ciencias en Física Educativa por el Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada del Posgrado en Física educativas del Instituto Politécnico Nacional. Es profesor del Instituto de Educación Media Superior de la Ciudad de México e investigador en educación desde el año 2006. Sus áreas de interés son: e-learning, sistemas tutores inteligentes, agentes animados y computación en realidad aumentada enfocadas a la enseñanza aprendizaje en educación media superior.