

El modelo estándar como célula generatriz y contexto sistematizador de contenidos en el curso de Física General



J. J. Llovera-González¹

¹*Departamento de Física, ISPJAE, calle 114 No.11901 entre 119 y 127, CP 10400, La Habana, Cuba.*

E-mail: llovera@electronica.cujae.edu.cu

(Recibido 28 de Marzo de 2010; aceptado el 7 de Mayo de 2010)

Resumen

Con el descubrimiento del quark top, en 1995, se confirmó una vez más en la práctica la validez del modelo estándar acerca de la estructura de la materia. La actualidad científica del tema así como el carácter esencial y sistematizador del modelo estándar han hecho necesaria y útil su incorporación paulatina a los Cursos de Física General desde hace más de dos décadas. En el presente trabajo se fundamenta una metodología didácticamente fundamentada para insertar las ideas básicas del modelo estándar en el curso tradicional de Física General revelando el papel sistematizador del modelo como “célula generatriz” para organizar el aprendizaje de los contenidos relativos a la Física Nuclear y a las nociones de cosmología, así como para consolidar otros contenidos ya estudiados en el Curso de Física General.

Palabras clave: Enseñanza de la Física, modelo estándar, reestructuración de contenidos, física de las partículas fundamentales.

Abstract

When the quark top was discovered in 1995, the validity of the standard model about the matter structure was confirmed again in the practice. The scientific actuality of this subject as soon as his essential and systematiser character has done necessary and useful a gradual incorporation of it to the General Physics Courses in the last two decades. In this paper a didactical methodology is presented for insert the basic ideas of the standard model in a classic general physics course revealing the systematiser role of the model like a “generator cell” and organizing the apprenticeship of new contents of the Nuclear Physics and the notions of cosmology so as refund another contents studied in the General Physics Course.

Keywords: Physics teaching, standard model, contents reorganization, physics of fundamental particles.

PACS: 01.40.gb, 01.40.Ha, 01.40.Fk

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

Si bien los que nos dedicamos a la enseñanza de la física estamos de acuerdo, en general, en el hecho de que el tema “partículas elementales” debe ser tratado en los Cursos de Física Moderna para físicos, muchos profesores no tienen en cuenta, a nuestro juicio, la importancia de incluir el tema en el Curso de Física General para contribuir a la formación de una concepción científica del mundo en los estudiantes.

Hace apenas 15 años el modelo estándar de la estructura de la materia no estaba aún totalmente corroborado, sin embargo con los experimentos sobre la dispersión de electrones por núcleos que revelaron la presencia de los quarks como elementos estructurales de los nucleones y que le valieron a Taylor y Friedman en 1990 el premio Nobel de Física y con el descubrimiento del quark top en el Fermilab, en 1995, se ha logrado una convincente confirmación de dicho modelo. En la actualidad se reconoce que el Modelo

Estándar es una consecuente teoría de las interacciones microscópicas fundamentales que explica con éxito la mayoría de los fenómenos conocidos en la física de la partícula elementales [1]. Por otra parte, los éxitos logrados en las teorías que hoy existen acerca de la evolución del Universo que tienen su fundamento en el modelo estándar es otro indicador que avala la necesidad de incluir los fundamentos de dicho modelo y los procesos que el mismo puede explicar en el Curso de Física General.

Al desarrollo de tecnologías para la aceleración y detección de partículas ha contribuido notablemente el trabajo en equipo de físicos e ingenieros de las más diversas especialidades en aquellos países que cuentan con los recursos para desarrollar estas investigaciones.

Por último el análisis de los principios físicos que tienen que ver con los procesos de predicción, producción y aislamiento, detección y caracterización de partículas fundamentales nos permite identificar en este tema un

contexto didáctico a partir del cual se hace posible la consolidación de conocimientos y habilidades ya adquiridos en otros temas del Curso de Física General así como servir de célula generatriz para organizar el aprendizaje del tema Física del Núcleo y de los fundamentos de cosmología.

El resto del trabajo se dedica a:

- 1.- Definir y argumentar un sistema de objetivos y de contenidos del tema partículas e interacciones fundamentales que puedan tener mayor incidencia en la formación general y politécnica de estudiantes de educación superior.
- 2.- Fundamentar metodológicamente el papel que puede jugar el aprendizaje de este tema, como contexto sistematizador, para la consolidación y aprendizaje de conocimientos y habilidades en el curso de Física General.
- 3.- Poner ejemplos de algunas tareas docentes y formas de enseñanza que permitan cumplir los objetivos propuestos para el tema desde la perspectiva de un curso de Física General universitaria.

II. LA TEORÍA DE LA FORMACIÓN POR ETAPAS DE LAS ACCIONES MENTALES Y LA REESTRUCTURACIÓN DE CONTENIDOS A APRENDER

Una de las teorías más acertadas acerca de como se desarrolla el proceso de aprendizaje es la teoría de la formación por etapas de las acciones mentales debida a Galperin. Esta teoría proporciona una explicación de como se produce el proceso de apropiación de los contenidos por parte de los estudiantes y considera que este proceso se divide en las siguientes etapas:

- Etapa motivacional.
- Etapa de la elaboración de la base orientadora de la acción (BOA).
- Etapa material (o materializada).
- Etapa del lenguaje externo.
- Etapa del lenguaje interno.
- Etapa mental.

Según esta teoría existen diferentes bases orientadoras de las acciones que se diferencian de acuerdo a su grado de generalización, completitud y forma de adquisición por parte de quien aprende siendo la llamada de tercer tipo (general, completa y adquirida de forma independiente) la que se reconoce como la más adecuada para producir aprendizaje significativo con un alto grado de apropiación y solidez del contenido a aprender [2] sin embargo, para lograr elaborar un programa de aprendizaje fundamentado en esta BOA se requiere realizar una reestructuración de los contenidos identificando células generadora y/o contenidos invariantes. En trabajos anteriores se han definido por el autor ambas categorías empleadas para clasificar los contenidos así como una metodología para ayudar a identificarlos en un tema, asignatura o disciplina [3, 4].

Una **célula generadora** la definiremos como un contenido tal que por su carácter esencial y simple puede servir de base para organizar el aprendizaje de otros contenidos más complejos que del mismo se derivan a partir de aplicarle determinadas leyes o principios de desarrollo.

El modelo estándar de la estructura e interacciones fundamentales en el Universo fue identificado como célula generadora de contenidos en el curso de Física General, a esto contribuye su simplicidad y potencialidades para explicar procesos tales como los mecanismos de interacción entre partículas que describen las interacciones fundamentales (gravitatoria, electro débil y fuerte) así como la estructura del núcleo atómico, de sus nucleones y la génesis de muchos de los procesos de desintegración, creación y aniquilación de pares de partículas característicos de la Física de altas energías.

También su alcance permite abordar como veremos algunos contenidos relacionados con los fundamentos de la cosmología al nivel de un curso de Física General.

III. REESTRUCTURACIÓN DE CONTENIDOS DE LA FÍSICA DEL NÚCLEO Y DE LAS PARTÍCULAS FUNDAMENTALES TOMANDO COMO BASE EL MODELO ESTÁNDAR

Al hacer un análisis del sistema de conocimientos que tienen que ver con el tema del estudio de las partículas fundamentales se puede concluir la existencia de los siguientes rasgos característicos en orden de evidencia:

- 1.- Sólida y compleja fundamentación teórica basada fundamentalmente en criterios de simetría.
- 2.- Notable manifestación de conceptos, principios y leyes de la Física relativas a diversas temáticas que se abordan en un curso de Física General clásicamente estructurado (mecánica, termodinámica, electromagnetismo, física cuántica, física nuclear) como parte de los fundamentos experimentales del tema.
- 3.- Carácter universal de los resultados obtenidos en la medida en que sirven de fundamento a la explicación de procesos característicos a escala microscópica (nuclear y subnuclear) que tienen repercusión en la explicación de otros procesos a escala megascópica (estrellas, huecos negros, Universo en evolución) no debiendo confundirse con el denominado modelo estándar de la cosmología del Big Bang como muy acertadamente remarca Matts [5].

Se trata entonces de definir un sistema de objetivos para el tema que se corresponda con los requerimientos de formación de los egresados de nivel superior y que sea alcanzable atendiendo al nivel de entrada del estudiante al abordar el tema. Tales objetivos deben contribuir a la formación del estudiante, tanto en la dimensión científico - cultural como en la dimensión profesional, siempre que sea posible.

Una vez definido el sistema de objetivos del tema se debe elegir y estructurar el sistema de contenidos necesario y suficiente para posibilitar el cumplimiento de los objetivos propuestos de tal forma que se propicie un mejor aprovechamiento del tiempo y la participación activa del alumno en la construcción del conocimiento.

Desde el punto de vista didáctico parece acertada una concepción metodológica que evada el enfoque eminentemente teórico sin dejar de tratar oportunamente algunos elementos de la teoría que sean suficientemente

sencillos y fundamentales como para que puedan asimilarse por un estudiante que no precisa adquirir una formación como la que recibe un estudiante de física teórica ya que no se forma como tal.

Resulta entonces más atractiva la idea de poner énfasis en el resto de los aspectos ya analizados y fundamentalmente en explotar didácticamente los dos siguientes:

- 1.- Los elementos de tecnología vinculados a los fundamentos experimentales del tema junto a la posibilidad de consolidar contenidos ya aprendidos. (rol sistematizador)
- 2.- El carácter universal del tema que posibilita a partir de su comprensión el estudio de los fundamentos de la Física del Núcleo y de las ideas básicas de una de las concepciones contemporáneas acerca de la evolución del Universo como lo es la teoría de la Gran Explosión. (rol de célula generatriz)

De acuerdo con el criterio anteriormente planteado se proponen los siguientes objetivos generales para el tema:

A. Objetivos del tema

1. Resumir los rasgos esenciales que caracterizan el modelo estándar de la estructura de la materia y aplicarlo como elemento sistematizador para explicar los procesos físicos que han dado lugar al estado de evolución actual del Universo y en particular a la estructuración de los núcleos y átomos y a la explicación de los procesos nucleares fundamentales.
2. Definir y aplicar los criterios de sistematización de las partículas estructuradas por analogía con los criterios de sistematización de los elementos químicos en la Tabla Periódica.
3. Identificar el carácter histórico relativo del criterio de elementalidad de una micropartícula así como la concepción contemporánea acerca de la estructura y evolución del Universo como manifestación de los principios filosóficos acerca de la cognoscibilidad y materialidad del mundo.
4. Consolidar el desarrollo de habilidades alcanzado en los temas anteriores del curso de Física General para:
 - Aplicar e interpretar las relaciones de indeterminación (a través de la introducción de los conceptos partícula virtual de intercambio y alcance de las interacciones).
 - Aplicar el principio de exclusión de Pauli.
 - Interpretar el principio de cuantificación ampliando el conjunto de números cuánticos conocido. (bariónico, leptónico, color y encanto)
 - Calcular las energías de enlace y de desintegración de partículas y procesos.
 - Aplicar los principios de conservación ya conocidos como criterios de imposibilidad e identificar nuevas propiedades de simetría de la naturaleza (paridad e isospín).
 - El cálculo de magnitudes físicas características del movimiento mecánico desde diferentes sistemas de

- referencia inerciales en el rango de velocidades relativistas.
- El cálculo de la longitud de onda de la onda de De Broglie y el análisis de la validez o no del modelo corpuscular para describir la interacción de dicha partícula con otra. (Definición de energías de penetración de los aceleradores).
- Interpretar las leyes que regulan el movimiento de partículas electrizadas en campos electromagnéticos como fundamento físico de los sistemas de aceleración y detección de partículas.
- Aplicar la ley de gravitación universal, las leyes de la radiación térmica y la ley de distribución de Boltzmann para explicar los niveles de energía que han caracterizado al Universo en el tiempo en sus diferentes etapas de evolución.

Veamos ahora que elementos de contenido están relacionados con cada uno de los objetivos anteriores y cómo proponemos estructurarlos sistémicamente para propiciar su aprendizaje mediante la resolución de tareas.

En relación con el primer objetivo el mismo está orientado a la asimilación de los fundamentos físicos del tema que son desconocidos para el estudiante y que constituirán el fundamento de la base orientadora para la asimilación de otros contenidos también reflejados en ese objetivo.

Los conceptos que deben ser asimilados como fundamento de la base orientadora son:

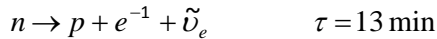
1. La necesidad de sistematizar una gran cantidad de partículas detectadas por el hombre y las evidencias experimentales de la factibilidad de hacerlo por analogía con la Tabla Periódica de elementos químicos.
2. La hipótesis de la estructura quarkica de los nucleones y la identificación de los quarks y leptones como partículas fundamentales (fermiones).
3. El modelo cuántico de interacción por intercambio y los bosones intermedios virtuales.
4. Las leyes de interacción fundamentales en la naturaleza y las partículas fundamentales que participan en estas.
5. Los resultados de la teoría de Dirac acerca del espín y el concepto de antipartículas. Concepto de vacío y fluctuaciones cuánticas.
6. La necesidad de atribuir una carga de "color" a los quarks y a los gluones intermedios, y el carácter "incoloro" de las estructuras quarkicas (hiperones, mesones, resonancias).
7. La introducción, de nuevos números cuánticos asociados a "cargas" que se conservan en determinados procesos de interacción y transformación de partículas tanto fundamentales como estructuradas. La asociación de dichas leyes de conservación a propiedades de simetría internas de las partículas y sus campos (carga bariónica, leptónica, isoespín, extrañeza).
8. Los criterios teóricos y prácticos que son considerados para investigar las partículas fundamentales en los aceleradores de partículas.

9. Las teorías unificadoras de las interacciones fundamentales (unificación electrodébil ya comprobada, Gran Unificación y Teoría del Todo)

Un elemento novedoso desde el punto de vista metodológico es introducir desde este momento algunos conceptos básicos que tradicionalmente se presentan en el contexto del núcleo atómico, estos son:

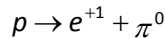
- Energías de enlace y de desintegración.
- El criterio para decidir si un proceso de desintegración puede ser o no natural.
- La ley exponencial de desintegración radiactiva y los parámetros que caracterizan este proceso.

Lo anterior se puede hacer a partir de analizar, por ejemplo, la estructura quarkica del mesón π^+ conociendo las masas de los quarks que lo estructuran y del propio mesón. También se puede considerar el proceso de desintegración natural que transforma el neutrón en protón según el esquema



para el cálculo de la energía de enlace.

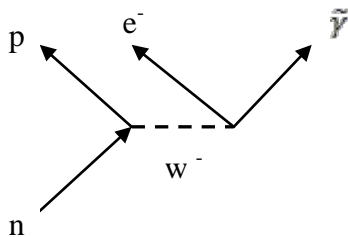
A partir de este proceso se puede introducir la ley de desintegración natural y ejemplificarla usando entonces otro ejemplo, el de la desintegración del protón, según el esquema



¿Por qué este proceso es tan poco probable, $\tau = 10^{31}$ años ?

A partir de esta base se puede abordar el estudio de la física nuclear comenzando por caracterizar la interacción entre nucleones como proceso de transmutación de quarks al transferirse gluones coloreados formándose pares $q\bar{q}$ (mesones) como estados intermedios.

También se puede explicar entonces la desintegración β^- como resultado de la interacción débil, según el diagrama de Feynman.



Otro contenido que se introduce utilizando el modelo estandar como célula generatriz es la explicación de procesos fundamentales que contribuyeron a la evolución del Universo hasta su estado actual.

El estudio de este contenido se puede organizar sobre la base de dos resultados experimentales, la ley de Hubble y la detección de la radiación relicta de microondas, que responde perfectamente a las leyes de la radiación térmica.

A partir de esta información se pueden organizar tareas docentes que faciliten al estudiante apropiarse del contenido

sobre la base de un trabajo independiente en pequeños grupos.

Esta concepción de organizar durante el proceso de aprendizaje la actividad individual y colectiva de los alumnos en el aula alrededor de la solución colectiva de tareas docentes está en la base de la teoría de la formación por etapas de las acciones mentales ya que propicia que dichas etapas se sucedan en cada estudiante según se vaya ampliando su zona de desarrollo próximo.

Por otra parte, y desde un enfoque constructivista, Díaz Barriga ha enfatizado que “la utilización de problemas y situaciones problemáticas que enfrenta el docente son la plataforma para construir el conocimiento didáctico integrador” [6].

Algunas de estas tareas posibles son:

Tarea 1

a).- Conociendo que la densidad del Universo en expansión en sus primeros tiempos es aproximadamente igual a la densidad de la radiación relicta térmica de fondo ρ_r y depende del tiempo según la relación:

$$\rho \approx \rho_{r,r} = \frac{3}{32 \pi G t^2},$$

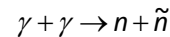
y utilizando la leyes de la radiación térmica demuestre que la ley de enfriamiento del Universo es

$$T \approx 10^{10} t^{-\frac{1}{2}} \quad (T \text{ en } K, t \text{ en } s).$$

b).- Asumiendo que la energía cinética del gas de fotones responde a la distribución de Boltzmann ($\frac{3}{2}kT$) obtenga la dependencia de la energía del Universo con el tiempo.

Tarea 2

Calcular la temperatura mínima del universo que permite la producción de pares nucleón- antinucleón a partir del choque de dos fotones según el esquema



¿A qué "edad" del Universo dejaron de ocurrir estos procesos?

La clase debe complementarse con un ejercicio en el que se analice el cumplimiento de las leyes de conservación en el proceso de formación y aniquilación de pares leptón- antileptón.

En relación con el estudio de la radiactividad y las reacciones nucleares tomando como base los contenidos asimilados en el estudio de las partículas e interacciones fundamentales, la propuesta metodológica permite ahora no tener que dedicar una clase teórica para el tema sino que el estudiante pueda asimilar nuevos contenidos en clases prácticas.

Algunas de las tareas docentes que se sugieren para estas clases son:

Tarea 3

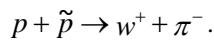
Aplicando el principio de indeterminación para la energía y el tiempo demuestre que la distancia mínima a la cual se pueden acercar dos partículas con energía E está dada por la expresión

$$r_{\min} \sim \frac{\hbar c}{E}.$$

Tarea 4

El bosón W^+ , portador de la interacción electro débil tiene una masa de $80 \text{ GeV}/c^2$

- a) ¿Cuál debe ser la energía mínima que debe liberarse de colisionar un p y un \tilde{p} en un colisionador para producir un bosón W^+ , según el esquema?



- b) ¿A qué distancia mínima se acercan las dos partículas para colisionar?
 c) ¿Cuál debe ser la energía mínima del antiprotón para que ocurra la misma reacción en un choque con un protón estacionado?

Tarea 5

Analice los siguientes procesos en términos de sus contenidos de quarks.

- a) $p \rightarrow n + e^+ + \gamma_e,$
 b) $n \rightarrow p + e^- + \tilde{\gamma}_e,$

y discuta la factibilidad de que se realicen espontáneamente siendo las partículas iniciales libres.

Tarea 6

¿Qué energía mínima debe tener un electrón para que pueda penetrar un núcleo sin difractarse? Considere que dada su pequeña masa el electrón puede alcanzar velocidades relativistas. La dimensión del núcleo es $\sim 10^{-15} \text{ m}$.

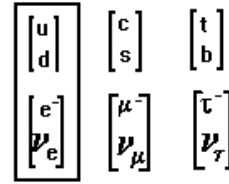
El resto de las tareas se deben relacionar específicamente con las desintegraciones y reacciones nucleares.

A manera de conclusiones del tratamiento del tema pueden resumirse las siguientes:

- Las posibilidades y limitaciones del modelo estandar en su etapa actual de desarrollo. Las posibilidades se han visto en las clases anteriores, las limitaciones están en aspectos aún no comprobados, como son:
- La detección experimental del ν_τ y el gravitón.
- La existencia de otros bosones intermedios que al igual que los W^+ , W^- y Z^0 permitieron unificar la interacción débil con la electromagnética, permitan lograr la Gran Unificación y la Teoría del Todo (Partículas de Higgs, bosones X, Y.)
- Resumir las partículas que hasta la fecha se consideran fundamentales según el modelo estándar

y la relatividad de este concepto así como sus generaciones.

- Los tipos de interacciones y sus características.



1ra Generación (Universo Actual)

- Las leyes de conservación que se verifican y las interacciones que las cumplen así como las propiedades de simetría asociadas y el concepto de simetría en si mismo.

B. Recomendaciones bibliográficas

Como texto guía pueden servir [7, 8] fundamentalmente, ambos tienen suficiente cantidad de ejercicios así como una exposición clara y sencilla del tema. Para profundizar en los conceptos a nivel descriptivo puede consultarse [9, 10, 11]. Para profundizar en los aspectos teóricos del tema se sugieren [5, 12].

Como texto para el alumno se sugiere imprimir un material monográfico en el que se resuman las ideas básicas tratadas en el tema dada la no disponibilidad de texto actualizado contentivo del enfoque de reestructuración propuesto.

IV. CONCLUSIONES

Se ha fundamentado una propuesta metodológica viable para incluir el tema partículas e interacciones fundamentales en el Curso de Física General.

La propuesta se caracteriza por los siguientes elementos no tradicionales:

1. El tema se aborda antes del contenido Física del Núcleo y le sirve de fundamento de la base orientadora de la acción para organizar el aprendizaje del mismo con más independencia por parte de los estudiantes.
2. Se incluye en el curso un conjunto de tareas docentes orientadas didácticamente al aprendizaje de nuevos contenidos así como a la consolidación de contenidos de física ya estudiados.
3. Se introducen elementos de cosmología también a partir de la resolución de tareas independientes sobre la base del uso del modelo estándar de las partículas e interacciones fundamentales.

REFERENCIAS

- [1] Altarelli, G., *The Standard Model of Particle Physics*, CERN-PH-TH/2005-206 arXiv:hep-ph/0510281 v1 21 Oct 2005.

J. J. Llovera-González

- [2] Talizina, N. F., *Psicología de la Enseñanza*, (Ed. MIR, Moscú, 1988).
- [3] Llovera, J. J., *Base orientadora de la acción para la determinación de contenidos invariantes y células generatrices*, Memorias del V Taller Internacional sobre la Enseñanza de la Física en Ingeniería (EFING` 2002) La Habana, 2002.
- [4] Llovera, J. J., *Aprendizaje de la Física por Invariantes*, Memorias de la III Conferencia Internacional sobre Educación Superior, UNIVERSIDAD 2006, La Habana, febrero de 2006.
- [5] Matts, R., *Introduction to Cosmology*, (3th. Edition. John Wiley & Sons. Ltd. 2003).

- [6] Díaz Barriga, F., *Estrategias Docentes Para un Aprendizaje Significativo*, (Mc.Graw Hill, México, 2000).
- [7] Halliday, D. y Resnick, R., *Física*. Vol. 2., (Cuarta edición, versión ampliada John Wiley & Sons, USA,1992).
- [8] Sears, F. W., Zemansky, M. W., *Física Universitaria* Vol. 2. Novena edición, (Addison-Wesley, Longman, 1996).
- [9] Novikov, I., *¿Cómo explotó el Universo?*, (MIR, Moscú 1988).
- [10] Ciencia Hoje. Vol. 18 No. 108, Abril. 1995.
- [11] Sociedad Brasileira de Física, *A Física no Brasil na Próxima Década*. Física Nuclear, Física de Partículas e Campos, Instituto de Física da USP, Sao Paulo 1990.
- [12] Sokolov, A. A., Ternov, I. M., *Electrodinámica Cuántica*, (MIR, Moscú, 1989).