



Física Nuclear & de Partículas: "Modelos Nucleares"

LIC. MANUEL J. ORDOÑEZ ORTIZ

- INTRODUCCIÓN
- MODELO DE LA PARTÍCULA INDEPENDIENTE
- MODELO DE CAPAS
- MODELO EXTREMO DE LA PARTÍCULA INDEPENDIENTE
- MODELO DE LA PARTÍCULA INDIVIDUAL
- MODELO DEL PAR INDIVIDUAL
- MODELO DEL OPERADOR
- MODELO DEL SUPERFLUIDO NUCLEAR
- MODELO UNIFICADO
- MODELO CRANKING
- MODELO CLUSTER
- MODELO OPTICO
- MODELO DE LA GOTA LÍQUIDA
- MODELO EXTENDIDO DE LA PARTÍCULA INDEPENDIENTE
- MODELO QUARK RELATIVÍSTICO
- EL MODELO TOY
- EL MODELO ESTÁNDAR DE HIGGS
*COLISIÓN NUCLEÓN - NÚCLEO EN EL
MODELO DE LA PARTÍCULA INDEPENDIENTE*
- EL MODELO DE CAPAS EN LOS ESTADOS
DOORWAY

El presente trabajo trata sobre los modelos nucleares que fueron ideados en sus comienzos para poder analizar el comportamiento y la estructura del núcleo.

INTRODUCCION

La Física Nuclear, como su nombre lo indica, es el estudio del núcleo; y sólo es un camino más que nos conduce a la búsqueda de nuestros antepasados. Es un camino muy largo que recorrer, maravilloso, con muchos vacíos físicos y sobre los cuales debemos saber caminar.

Es por esto que el hombre dedicado a esta parte de las ciencias ha ideado una serie de modelos nucleares que permiten conocer, por lo menos en parte, la estructura nuclear y su comportamiento en procesos de interacción con otros cuerpos o partículas.

En esta primera parte damos a conocer, en forma concisa, algunos modelos nucleares:



Modelo de la Partícula Independiente

En este modelo se considera que los nucleones individuales (nucleón se denomina al par protón-neutrón) se mueven en órbitas estacionarias y que están apareados de modo tal que los parámetros nucleares sólo quedan determinados por un solo nucleón no apareado.

Este modelo no considera el movimiento correlativo, ni el movimiento colectivo de los nucleones; de allí las limitaciones del modelo cuando se quiere explicar los efectos cuadrupolares del núcleo.

Modelo de Capas

Este modelo considera que cada nucleón se mueve en una órbita permanente con un momento angular fijo. Es por ello que es posible atribuir un potencial central a la, fuerza efectiva sobre un nucleón.

En este modelo a cada órbita se le asocia un número cuántico "L", para el cual hay "2L + 1" estados degenerados. Naturalmente que "L" no es el único número cuántico asociado a un nucleón, también están "Y", "S", "I", "Q", "B", "Spin", entre otros.

Algo que recalcar en este modelo es que la existencia de los llamados números mágicos se explica en el acople Spin-Orbita.



Modelo Extremo de la Partícula Independiente

Es un caso muy simple del modelo de capas. En este modelo se considera que los nucleones, en su estado fundamental, tienen un movimiento apareado, aún si las propiedades nucleares son atribuidas al último nucleón no apareado. El modelo admite una fuerza de interacción entre los nucleones de capas que no están completamente llenas, mas no admite movimiento correlativo entre nucleones.

Modelo de la Partícula Individual

Este modelo nos permite describir un método para obtener las funciones de onda nucleares, las cuales en principio son muy exactas; pero que en realidad están ligadas a una aproximada validez del modelo de capas.

En principio sólo se toman las funciones de onda de los nucleones que están muy próximos al centro de masa de "K" nucleones. El tratamiento del modelo es puramente matemático basado en potenciales centrales.

Modelo del Par Individual

Consiste en considerar sólomente un par de nucleones inmerso en la materia nuclear y sometido a procesos de interacción en su medio. En este modelo se introduce el concepto

de potenciales no locales en el espacio ordinario; esto significa que la energía cinética de una partícula no sólo depende de la posición "r" sino también de las funciones de onda definidas en los puntos cercanos "r'" de "r".

En este modelo se introduce el concepto de la distancia de salvación, lo cual significa que a partir de cierta distancia (1 fem) las funciones de onda de los nucleones se pueden considerar como aquellas de las partículas libres.

Modelo del Operador

Es un modelo alternativo para realizar estudios sobre el núcleo; está basado en la idea simple: para cada estado real nuclear ψ le corresponde una simple función de onda ϕ y un operador F tal que:

$$\psi = F \phi$$

donde ϕ se elige como una función de onda de modelo de capas y F un operador unitario que satisfaga:

$$H' = F^{-1} H F$$

Siendo H' el Hamiltoniano en el modelo de capas.

Modelo del Superfluido Nuclear

Este modelo está basado en el

comportamiento de los electrones en un metal en el estado superconductor. Para ello el concepto de la partícula ha sido reemplazado por el de Quasi-partícula.

Lo más importante de éste modelo es que sólo la interacciones entre pares de partículas en el mismo estado son importantes; es por esto que se les llama *Pares conjugados*.

Modelo Colectivo

Este modelo está basado en la separación en el tipo de comportamiento de los nucleones.

Considerando toda la materia nuclear, hay nucleones que están formando parte de del llamado "corazón nuclear" y que tienen un comportamiento colectivo controlado por un Hamiltoniano que depende sólo de variables colectivas; y hay nucleones externos a este corazón nuclear que están en interacción con los nucleones del corazón nuclear tratando de polarizar su comportamiento colectivo.

Son estos nucleones externos los que dan a la masa nuclear un comportamiento intrínseco controlado por un Hamiltoniano intrínseco. Por consiguiente, el Hamiltoniano de toda la masa nuclear vendría dado por la relación:

$$H = H_c \text{ (variables colect.)} + H_i \text{ (variables intríns.)} + H_{\text{acople}}$$

Modelo Unificado

Este modelo es sólo una extensión del modelo de capas, donde ahora se asume que el potencial del modelo de capas es no esférico y que las distorsiones en los mínimos de energía son calculables.

En el estudio de este modelo se usan en primera aproximación los potenciales armónicos con la ayuda del concepto hidrodinámico del núcleo conocido como *"la gota del líquido nuclear"*.

Modelo Cranking

Este modelo fue ideado en 1956 para estudiar el momento de inercia nuclear. En este modelo se supone que el movimiento rotacional nuclear es lento en comparación con su movimiento intrínseco, hecho que permite considerar constante la energía necesaria para rotar el sistema nuclear conjuntamente con su movimiento interno.

Modelo Cluster

Este modelo nos permite estudiar la materia nuclear como un agrupamiento o agregado de materias nucleares más pequeñas. Por ejemplo, el carbón doce (${}_{6}C^{12}$) puede estudiarse como un agrupamiento de tres partículas alfa en interacción; o como un agrupamiento del B_e^8 con una partícula alfa; etc.

Sin embargo este modelo no es funcional para estados nucleares de baja densidad.

Modelo Optico

Este modelo fue ideado para tener en consideración el posible fenómeno de la absorción de una partícula que interactúa con la materia nuclear.

Cuando la luz interactúa con los átomos o moléculas individuales de una sustancia transparente, es absorbida y luego reemitida con un cambio de fase. Este proceso queda caracterizado por un índice de refracción macroscópico.

En el caso de la interacción de los nucleones con los potenciales nucleares, el índice de refracción queda caracterizado por dicho potencial.

El modelo óptico supone que el núcleo es una esfera de materia nuclear que transmite, refleja, refracta y absorbe las ondas de los nucleones incidentes.

El modelo óptico se desarrolla en base a un potencial imaginario, no local, porque depende de la densidad nuclear; y además incluye el término de acople Spin-Orbita (el potencial imaginario es considerado con una componente real y otra imaginaria).



Modelo de la Gota Líquida

Se supone en este modelo al núcleo como una gota líquida uniformemente cargada; lo cual permite explicar las energías que provienen de la distorsión del núcleo en su proceso de fisión nuclear.

Los postulados de este modelo son muy similares a los postulados de la ecuación de masa:

Primero: El término dominante en la ecuación de masa es proporcional al volumen nuclear y expresa el hecho que la energía de enlace nuclear es proporcional al número de nucleones (cuando se discute la distorsión del núcleo, se asume la conservación de su volumen); es decir, que este término es independiente de la distorsión nuclear y por lo tanto no aparece en el modelo de la gota líquida de la fisión nuclear.

Segundo: Un segundo término, de signo opuesto, en la ecuación de masa es proporcional al área de la superficie y toma en cuenta la reducción en los enlaces asociado con los nucleones en la superficie nuclear.

Tercero: Un tercer término en la ecuación de masa nos da el término coulombiano que permite describir la fuerza repulsiva entre los protones.

Cuarto: Un cuarto término, proporcional a $(N - Z)^2 / A$, es denominado el término de simetría de energía.

Este término depende sólo del volumen nuclear y no de la distorsión del núcleo.

En pocas palabras, el modelo de la gota líquida, en su forma más simple, describe los cambios en la energía potencial asociados con la distorsión de la forma nuclear, como una consecuencia de los efectos de superficie y los efectos coulombianos.

En este modelo idealizado de los núcleos no se toma en cuenta los efectos de capas (modelo de capas) ni las interacciones residuales que provienen del movimiento de partículas independientes en el núcleo. Los cambios en la energía de Coulomb y en las energías de superficies provocados por la distorsión del núcleo son de magnitud comparable pero de signo opuesto. Sin embargo, para contribuciones de orden superior en la ecuación de masa, estos dos efectos se pueden cancelar, dando de esta manera mayor importancia a los efectos de una sola partícula (se debe entender, de una partícula independiente); que son pequeños comparados con los efectos coulombianos y de superficie, comparándolos por separado.

Modelo Extendido de la Partícula Independiente

Sin embargo, el Modelo de la Gota Líquida no es el adecuado para predecir muchas propiedades de la estructura nuclear; en especial, no es

adecuado para predecir los efectos asociados con la estructura de capas del núcleo.

El modelo de capas y el modelo de la partícula independiente han podido explicar los vacíos de capas, los efectos de los Spines y los efectos de la Paridad en los núcleos con un número impar de Neutrones o Protones.

El Modelo de la Partícula Independiente asume que cada nucleón se mueve en una barrera de potencial, la cual no es más que una aproximada representación de la interacción de un nucleón con los otros nucleones.

Si calculamos los auto-estados de un potencial esférico cuyas dimensiones son consistentes con las propiedades conocidas del núcleo, encontramos que el correcto orden de los niveles de energía se obtiene sólo tomando en cuenta el acople Spin-Orbita (L, S).

El modelo esférico de la partícula independiente (se dice esférico por la simetría de su potencial) ha dado buenos resultados en cuanto a la inclusión de los números cuánticos N y Z en regiones de una estabilidad especial relacionada con el llenado de capas y subcapas.

Este modelo también ha dado muy buenos resultados en lo que corresponde a la inclusión del Spin y la paridad de los núcleos en las

regiones cerca a las capas llenas; sin embargo cuando el núcleo se encuentra lejos de la zona de las capas cerradas, presenta un efecto rotacional que es constantemente deformado.

Ahora bien, si extendemos el modelo de la Partícula Independiente a potenciales no esféricos entonces es posible analizar el Spin y la Paridad también de núcleos deformados.

Además de los modelos arriba mencionados existen otros modelos nucleares más sofisticados relacionados con la existencia de campos mesónicos en la materia nuclear. A manera de referencia menciono sólo algunos de ellos:

Modelo Quark Relativístico

Este modelo considera el uso de los operadores espaciales de Creación y Aniquilación para QUARKS y ANTIQUARKS.

Cuando se toman en cuenta los efectos creados por la presencia de los QUARKS livianos y los QUARKS pesados, entonces se hace necesario tomar en cuenta un Potencial Estático confinado $V(r)$ cuya forma queda dada por el acople QUARK-ANTIQUARK; quedando el Hamiltoniano definido por la relación:

$$H = H_0 + V(r)$$



El Modelo Toy

Es un modelo de dos sistemas cuyo Hamiltoniano toma la forma indicada:

$$H = H_1 \otimes I_2 + I_1 \otimes H_2 + H_I$$

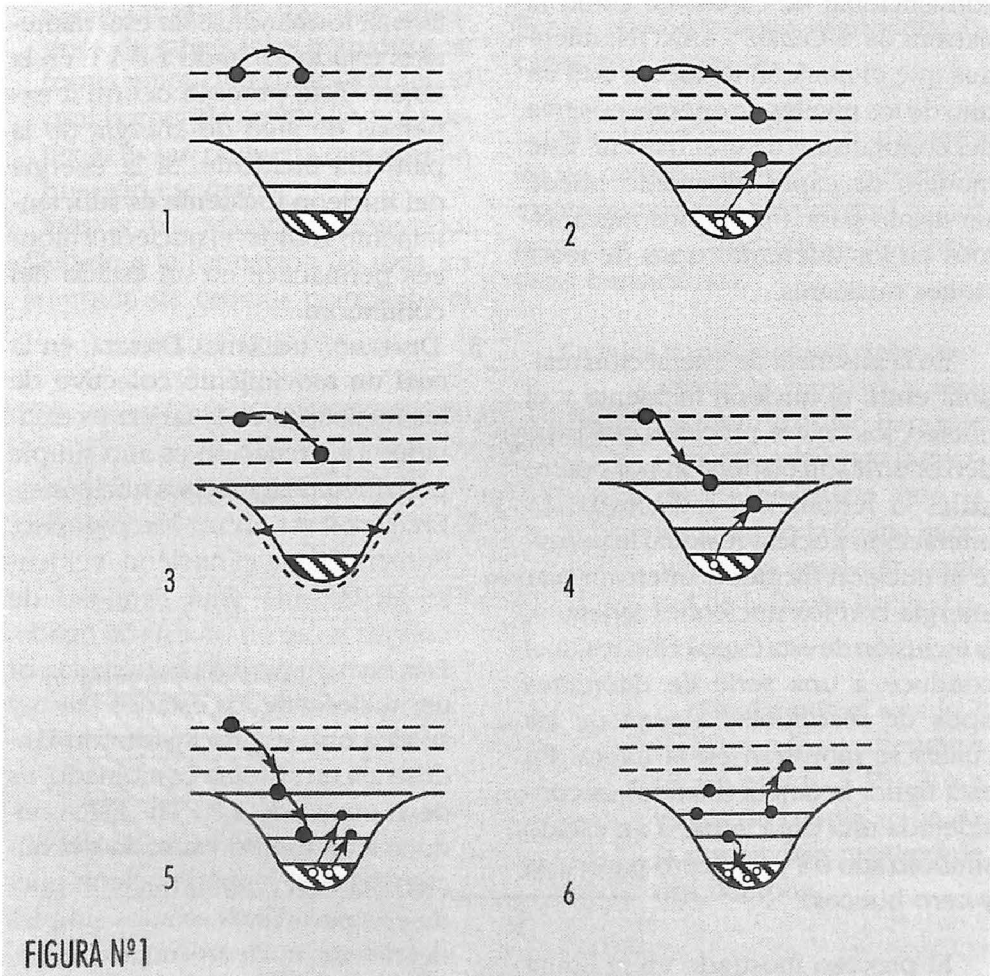
Donde I_k representa un operador unidad en el espacio del subsistema k . El sistema 2 queda representado

por el Spin: H_I es el Hamiltoniano de interacción.

El Modelo Estándar de Higgs

Este modelo es considerado cuando hay ruptura en la simetría electrodébil.

A manera de ilustración mostramos dos aplicaciones sencillas del



Generación de estados a través de procesos de dispersión múltiple en el modelo de capas para reacciones nucleares.

modelo de la Partícula Independiente y del modelo de capas.

Colisión Nucleón - Núcleo en el Modelo de la Partícula Independiente

Explicamos lo que ocurre cuando un nucleón entra a la materia nuclear. Se considera que los nucleones en el núcleo se encuentran en una barrera finita del tipo usado en el modelo convencional de capas; tal como la barrera de WOODS - SAXON; mientras que el nucleón incidente está en uno de los niveles de energía positiva del continuo de esta barrera. Este modelo de capas extendido puede ser usado para analizar los mecanismos en los diferentes tipos de reacciones nucleares.

En la ausencia de interacción residual entre el nucleón incidente y el núcleo, los únicos procesos que pueden ocurrir son dispersión por potenciales o fenómenos radiactivos. La interacción nuclear residual le permite al nucleón incidente intercambiar energía con los nucleones tarjeta; y, la inclusión de esta interacción residual conduce a una serie de diferentes tipos de reacciones, alguna de las cuales se muestran en la figura. En esta figura la tarjeta (blanco) es considerada una capa llena, o un estado simbolizado $0 P - 0 h$ (cero partículas y cero huecos).

El proceso mostrado en la figura anterior consiste en lo siguiente:



1. POTENCIAL DISPERSIVO: El nucleón incidente se dispersa bajo la acción de un potencial de un sólo cuerpo sin intercambiar energía con algún nucleón cualquiera del núcleo. El sistema combinado Nucleón Incidente - Tarjeta forma un estado $1 P - 0 h$.
2. DISPERSIÓN INELÁSTICA DIRECTA: El nucleón incidente transfiere energía a la tarjeta excitando un nucleón hacia otro estado ligado de la tarjeta; formándose de esta manera el estado excitado $1 P-1 h$ en la tarjeta. Este proceso ocurre a expensas de algo de energía de la partícula incidente. Si la energía del nucleón incidente es suficientemente grande, el nucleón entonces permanece en un estado del continuo.
3. DISPERSIÓN INELÁSTICA DIRECTA, en la cual un movimiento colectivo de los nucleones en la tarjeta es excitado. La excitación es aún simple pero involucra muchos nucleones.
4. EXCITACIÓN DEL NÚCLEO PRECOMPUESTO: Primera Etapa, el nucleón incidente pierde una gran cantidad de energía y cae en un estado ligado. Esta energía perdida es tomada por un nucleón de los estados bajos y se va a otro estado ligado formándose así un sistema combinado; es decir un estado $2 P - 1 h$. Esto conduce a un estado excitado del núcleo del cual ningún nucleón puede escapar. Estos estados simples del sistema nucleón - núcleo alcanzados en la primera colisión de un nucleón con el núcleo actúan como los llamados estados DOORWAY

en el núcleo compuesto.

5. EXCITACIÓN DEL NÚCLEO COMPUESTO: Segunda etapa, El estado formado en la primera colisión puede también excitar otra partícula pasándola a un estado ligado, perdiendo una energía adicional y creando así un estado $3 P - 2 h$. Además también ocurren excitaciones por colisiones internas, las cuales generan toda una jerarquía de estados más complicados tales como $4 P - 3 h$; $5 P - 4 h$; ... etc. Después de tantas tales colisiones se forma un núcleo compuesto en el cual la energía promedio por partícula es tan pequeña que ningún nucleón escaparía.
6. EMISIÓN DEL NÚCLEO PRECOMPUESTO: Debido a la formación de toda un jerarquía de estados complejos el

núcleo puede entonces adquirir suficiente energía para escapar antes que se forme el núcleo compuesto.

El Modelo de Capas en los Estados Doorway

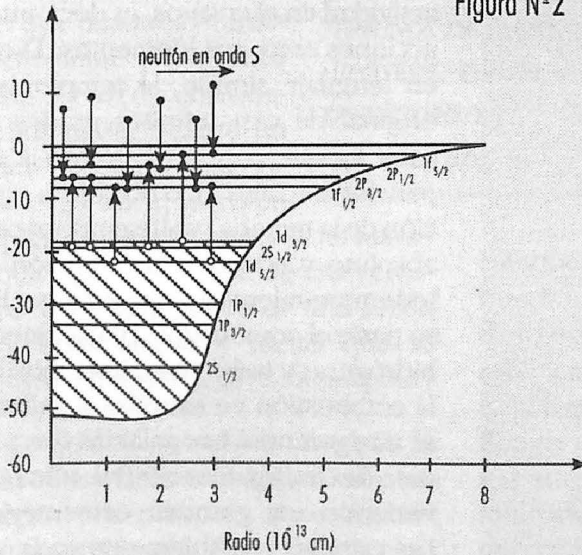
Para ilustrar el modelo de los estados intermedios Doorway se ha considerado el elemento Calcio (40_{Ca}) sobre el cual incide un neutrón. En la Figura Nº2 se muestra el modelo de capas para el calcio.

El neutrón de onda S puede caer en un orbital ligado $2 P_{3/2}$, mientras excita un nucleón del estado $2 S_{1/2}$ al nivel $2 P_{3/2}$. También se muestran otras transiciones.

En tales transiciones se debe conservar la paridad y momentum angular. Para que se pueda conservar la energía es necesario que la longitud de la flecha hacia arriba sea igual a la longitud de la flecha hacia abajo.

Finalmente el estado $2 P - 1 h$ puede desintegrarse en un estado $3 P - 2 h$ a través de la aplicación de la interacción residual de dos cuerpos.

Figura Nº2



Niveles del Calcio 40 en el modelo de capas y el tipo de estados $2 P - 1 h$ alcanzados desde un neutrón en un estado de onda S