

AUTORES: CRIADO PÉREZ, A., CRIADO G^a-LEGAZ, A.M.,M^{NEZ} GOBANTES, L.

TITULO: Exposición didáctica de conceptos cuánticos.

TIPO DE PARTICIPACIÓN:

CONGRESO: *XII Encuentro de Didáctica de Ciencias Experimentales.*

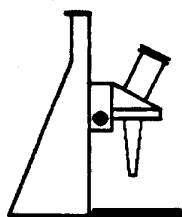
PUBLICACIÓN: *Actas pp. 121-127*

LUGAR DE CELEBRACIÓN: EUM. Univ. Oviedo.

AÑO: 1991

ACTAS

XII Encuentros de Didáctica de las Ciencias Experimentales



Escuela Universitaria de Magisterio
Oviedo

Compone, edita e imprime: **SERVICIO DE PUBLICACIONES**
UNIVERSIDAD DE OVIEDO.

Director: Prof. Dr. Ubaldo Gómez.

D.L.: AS/2019-92.

I.S.B.N.: 84-7468-729-2.

EXPOSICION DIDACTICA DE CONCEPTOS CUANTICOS

A. M. Criado Pérez, A. Criado G^a-Legaz, L. Martínez Gobantes

Universidad de Sevilla

INTRODUCCION

En un curso de Física General, a nivel universitario, es imprescindible el estudio de los conceptos básicos de Física Cuántica y de sus más importantes consecuencias (estructura atómica, láser, teoría de bandas,...). En este trabajo hacemos una propuesta, para uso del profesor, de estructuración de un sistema conceptual (ver esquema organizador del anexo), que se resume en dos fases:

1^a) Distinción entre las características más generales y relevantes de la Física Clásica (nivel macro) y de la Física Cuántica (nivel micro).

2^a) Partiendo de la naturaleza discreta de la realidad física, (apdo. II.1) y de la descripción dual, —ondulatoria y corpuscular—, de los procesos físicos a nivel microscópico (apdo. II.2), se introduce la naturaleza probabilística (función de onda, Principio de Heisenberg) y la cuantización de las magnitudes físicas asociadas a las partículas ligadas y a las interacciones.

Metodológicamente se procederá introduciendo los nuevos conceptos a partir de la descripción y el análisis de evidencias científicas clave, que motivaron el cambio conceptual, destacando su sentido físico y utilizando un imprescindible formalismo matemático elemental.

I. FISICA CLASICA

Nos limitaremos en este apartado al desarrollo conceptual, obviando las experiencias clave cuya elección dejamos a criterio del profesor.

La representación física del nivel macroscópico estructura nuestro conocimiento de la realidad inmediata y comprende la mecánica Newtoniana, la Termodinámica y el Electromagnetismo de Maxwell, caracterizándose por los siguientes aspectos:

I.1. MATERIA Y ENERGIA: Cada una de ellas se conserva en todos los procesos físicos. la materia se presenta en forma de partículas o medio continuo, se describe por sus propiedades (\vec{r} , \vec{v} , m , q , ...) y sus interacciones -gravitatoria y electromagnética-. La ener-

gía se puede presentar: a) Ligada a la materia (E. Cinética, Potencial, Interna y Propia). b) Desligada de la materia, (E. Radiante, ondas constituidas por oscilaciones transversales de los campos \vec{E} y \vec{H}).

I.2. CONTINUIDAD: los valores de las magnitudes físicas pueden variar con continuidad, (excepción hecha de los referentes a ondas estacionarias).

I.3. CARENIA DE DUALIDAD: existen dos descripciones físicas, partícula y onda, que son excluyentes e incompatibles:

Corpúsculo

—localización puntual $\vec{r}(t)$

—transporte de \vec{p} y E simultáneamente a m.

—colisión

—sombra

Onda

—distribución en un frente de onda

$f(x, y, z, t_0) = 0$

—transporte de \vec{p} y E sin arrastre de m.

—interferencia (superposición)

—difracción

I.4. DETERMINISMO: se pueden conocer simultáneamente, todas las magnitudes que definen un estado, y a partir de él, dadas las interacciones, determinar unívocamente el estado que resulta de su evolución temporal.

II. FISICA CUANTICA

Sus características se exponen en los epígrafes II.1, II.2, II.3, citándose las evidencias científicas que han de describirse y analizarse para introducir los conceptos de os apartados mencionados.

II.1. CARACTER DISCRETO DE LA REALIDAD FISICA

II.1.1. MATERIA:

1^a) Las leyes estequiométricas de la Química y las de los gases implican la existencia de *átomos* químicos y moléculas. La clasificación de elementos (Mendeleiev) manifiesta su periodicidad y su número atómico Z, y conduce a la predicción de la existencia de nuevos elementos.

2^a) La radioactividad evidenció la divisibilidad, transmutabilidad e istopía de los átomos, así como la existencia de partículas comunes (α y β), constitutivas de los elementos.

3^a) El estudio de la conducción eléctrica de gases a baja presión, sometidos a la acción de campos electromagnéticos, mostró:

— el análisis del gas en partículas (e^- y cationes)

— la existencia de una partícula ligera (*leptón*) constituyente universal de todos los elementos: el electrón (rayos catódicos)

— la existencia de partículas pesadas, restos atómicos, de masa proporcional al peso atómico del isótopo (rayos anódicos). Estas experiencias son el fundamento de los espectrógrafos de masas).

4ª) La dispersión de partículas α , ($E \approx \text{ev}$), por átomos permitieron a Rutherford detectar el *núcleo* y medir su carga Ze .

5ª) Análogamente, la dispersión por nucleones de partículas de alta energía ($E \approx \text{GeV}$), obtenida en los modernos colisionadores y aceleradores lineales, ha permitido explorar el interior de los nucleones y descubrir que están compuestos por "*quarks*", previstos por Gell Mann en la clasificación de las partículas elementales. Los quarks se asocian por parejas o por tríos, (generando mesones y nucleones respectivamente).

II.1.2 CARACTER DISCRETO DE LAS INTERACCIONES:

Las partículas de materia (leptones y quarks), de n° leptónico y bariónico constantes, dotadas de carga y de $m_0 = 0$, son fermiones y por el principio de exclusión no se pueden concentrar indefinidamente. Intercambiando *bosones* (indefinidamente concentrables), se ejercen entre ellas cuatro clases de interacción: fuerte, electromagnética, débil y gravitatoria, (gluón, fotón, W^{\pm} , Z^0 , y gravitón). La electromagnética es la mejor estudiada y su estructura dual ha servido de modelo a las demás.

II.1.3. CARACTER DISCRETO DE LA CARGA Y DE LA ACCION:

Las leyes de la electrolisis, ($F = e \cdot NA$), y las medidas de Thomson y Millikan determinaron el valor de la carga elemental (e^-).

Planck, para explicar la intensidad de la energía correspondiente a cada una de las frecuencias que componen el espectro continuo radiado por un sólido incandescente, postuló que la emisión y absorción de energía por cada oscilador del microcosmos se realiza en forma de paquetes, *cuantos*, $E = h \cdot \nu$. Lo que equivale a que, en un microoscilador de período T y energía E , la magnitud S , "acción", varía en forma discreta: $\Delta S = nh$, $h = \text{cte. de Planck}$: $\Delta S = E \cdot T$, $E = nh / T = nh\nu$. El efecto fotoeléctrico (Einstein-Millikan), los espectros de rayas de los gases, la experiencia de Franck y Hertz, la ley de Duane-Hund,.... corroboran la hipótesis de Planck.

El carácter corpuscular de la radiación fue confirmado cuando se verificó la existencia del momento lineal de los fotones (efecto Compton,....). Las propiedades de los fotones se resumen en: $E = h\nu$, $p = h/\lambda = h\nu/c$, $m_0 = 0$, $m = h\nu/c^2$.

La naturaleza corpuscular es más patente cuanto mayor es la frecuencia de los fotones:

$$\text{ONDA CORTA: } \lambda = 30 \text{ m, } \nu = 10^7 \text{ Hz, } E = h\nu = 4.1 \cdot 10^{-8} \text{ eV}$$

$$\text{RAYOS X : } \lambda = 1 \text{ \AA, } \nu = 3 \cdot 10^{18} \text{ Hz, } E = h\nu = 12,3 \cdot 10^3 \text{ eV}$$

Análogamente, el análisis de la estructura de las otras interacciones da por resultado su micronaturaleza corpuscular.

II.2 DUALIDAD ONDA-CORPUSCULO

Las experiencias con electrones u otras partículas atómicas, de Davission y Germer, (reflexión interferencial en un monocristal), o de Thomson, (transmisión con difracción, a través de un pan metálico), han mostrado su *indeterminación intrínseca*. Cualquier micro-

partícula, partiendo de un mismo estado mecánico inicial, puede evolucionar a varios posibles estados. La probabilidad de ocurrencia de cada uno de éstos corresponde a la intensidad de una *onda material*, Ψ , asociada a la partícula. La probabilidad de localización de la partícula en r es proporcional a $\Psi^2(\vec{r})$. Esta "onda piloto", fue postulada por de Broglie.

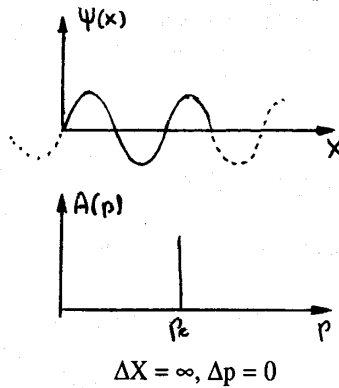
Para un sistema simple, una micropartícula, se tienen los casos:

1.- Partícula libre, $e>0$, móvil sobre el eje X

a) Deslocalizada: Ψ es una onda armónica monocromática plana, ocupación equiprobable de todo el eje X; $\Delta X = \infty$, $p = p_0$, $\Delta p = 0$ (fig. 1)

$$\Psi = A \exp [j k_0 x - w_0 t] = A \exp [j (p_0 x - E_0 t) / \hbar], \text{ Prob } (x, x + dx) = \Psi^2(x) = A^2 dx$$

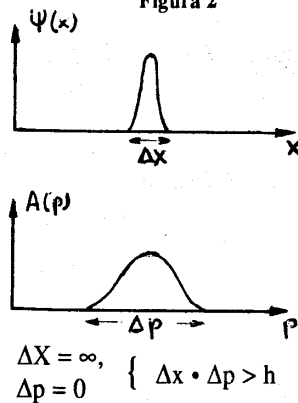
Figura 1



b) Localizada: Ψ es un paquete de ondas formado por la superposición infinita de ondas planas infinitesimales de impulsos próximos a uno dado p_0 . (fig. 2)

$$\Psi = \int_{p_0 - p/2}^{p_0 + p/2} A(p) \exp[j(px - \epsilon t) / \hbar] \cdot dp$$

Figura 2

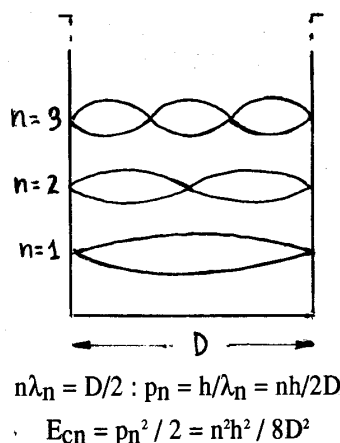


2.- Partícula ligada $E < 0$: Ψ es una onda estacionaria.

Físicamente la partícula se encuentra en el interior de un pozo de potencial ($0 < X < D$). En un pozo rectangular de profundidad infinita, las ondas materiales se reflejan en los límites y originan un conjunto numerable de ondas estacionarias:

$$\Psi_n = A_n \sin(n\pi/D) \exp. [jE_n t/h], \text{ p y E están cuantizados (fig. 3)}$$

Figura 3



Estos resultados son generales. "En los *estados libres/ligados* de un microsistema con varios grados de libertad, los valores de sus magnitudes físicas forman *espectros continuos/discretos*".

Para un átomo hidrogenoide, en los estados de simetría esférica, $\Psi(r)$, se puede considerar que el electrón está en un pozo de potencial hiperbólico $E = -Z^2 k/2r$, y su onda asociada es estacionaria: $2\pi r_n = n\lambda_n = nh/p_n = nh/mv_n$; y dado que es $mv_n^2/r_n = ke^2 Z/r_n^2$, la energía del nivel n está cuantizada. Como $E_n = -Z^2 k^2 e^4 / 2h^2 n^2$ el fotón emitido al pasar del nivel n_1 al n_2 es:

$$h\nu_{12} = E_2 - E_1 = (Z^2 k^2 e^4 / 2h^2) (1/n_1^2 - 1/n_2^2) \text{ (fórmula de Bohr).}$$

Para un microsistema, la medición de un observable produce una perturbación "inevitable e imprevisible" en algunas otras de sus magnitudes. El carácter discreto de la acción $\Delta S = n \cdot h$ y la naturaleza dual, (toda limitación de un frente de onda implica su difracción y con ella una variación de \vec{p}), clasifica las magnitudes del sistema en pares "observables conjugados q_i y p_i ", cuyo producto tiene dimensiones de acción y verifica el *principio de Heisenberg*. "El producto, $\Delta q_i \cdot \Delta p_i$, de las incertidumbres producidas en la medida resultante de q_i y p_i es mayor que h ":

$$\Delta x_i \cdot \Delta p_i > h, \Delta \phi \cdot \Delta L\phi < h, \Delta t \cdot \Delta E > h$$

El conocimiento que nos proporciona Ψ es *probabilístico*: se renuncia a las órbitas,

que se sustituyen por orbitales. Repitiendo una medida en un sistema, (bajo las mismas condiciones), se obtienen en general una serie de resultados distintos pero integrados en una regularidad estadística: un conjunto de núcleos radioactivos, en iguales condiciones físico-químicas, se desintegra en instantes distintos; el valor del número $N(t)$, de núcleos no desintegrados en el instante t , obedece a la ley, $N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t)$, pero la medida de la duración de supervivencia de un núcleo determinado sólo es previsible con cierta probabilidad.

Efecto túnel: Sea una barrera rectangular de potencial $V(x)$, de altura V_0 y anchura a . Clásicamente, una micropartícula de energía $E_0 = (px^2/2m) < V_0$ rebota en ella, su energía cinética dentro de la barrera sería negativa $E_0 = E_0 - V_0 < 0$. Cuánticamente, es posible una fluctuación energética $\Delta E = V_0 - E_0$ tal que, si Δt , (que es función de a), es la duración del paso de la partícula a través de la barrera se verifica: $\Delta E \cdot \Delta t > h$ y existe una posibilidad de que la partícula atraviese la barrera con una probabilidad tanto mayor cuanto menor sean V_0 y a .

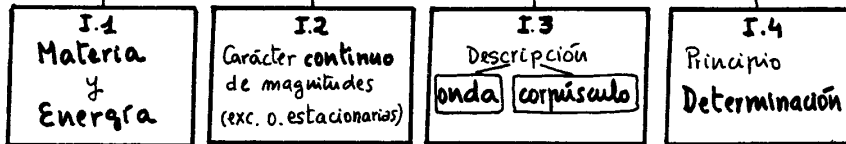
Conducción eléctrica de sólidos: En un cristal, los electrones están sometidos a un potencial periódico $v(\vec{r})$ generado por los núcleos ordenados reticularmente. Un modelo monodimensional simplificado de un cristal es una alineación periódica de átomos sobre el eje X , que generan un potencial $V(x)$ equivalente a un conjunto de barreras de potencial iguales, cuya anchura disminuye al crecer V . Los electrones de los niveles atómicos internos encuentran la barrera ancha y alta, es poco probable que la superen. Los correspondientes a niveles atómicos superiores, encuentran la barrera baja y estrecha, fácilmente atravesable por efecto túnel, estos electrones se desligan de un átomo determinado, pasan de uno a otro, y forman un gas electrónico de Fermi (banda de valencia). Al actuar un campo eléctrico sobre el cristal aparece otra banda más energética, de conducción, en principio no ocupada. Si la banda de valencia se solapa o está cercana a la banda de conducción los electrones saltan a esta banda y el cristal es conductor. En caso contrario el cristal es semiconductor y en último extremo, aislante.

Finalmente, por razones de limitación de espacio, sólo citaremos aplicaciones de gran actualidad como: al emisión espontánea y estimulada (láser), la superconductividad, etc., que no han de ser olvidadas por el profesor que trate este tema.

BIBLIOGRAFIA

- P.C. W. Davies 1984. El espíritu del átomo. A.U. nº 1.421.
S. Deligeorges et al. 1990. Compilación: El mundo cuántico. A.U. nº 641.
R.P. Feynman 1988. Electrodinámica cuántica. A.U. Nº 568.
Hey, T. y P. Walters 1989. El universo cuántico A. Ed.
Y. NE' Eman. Y. Krish 1988. Los cazadores de partículas. Col. Límites de la Ciencia. Gedisa.

I. FISICA CLASICA (macronivel)
 Órdenes de magnitud: $L \approx 1\text{m}$, $m \approx 1\text{kg}$, $E \approx 1\text{J}$, $q \approx 1\text{C}$, $n \approx N_A \approx 10^{23}$



II. FISICA CUANTICA (micronivel)
 Órdenes de magnitud: $L \approx 1\text{Å} = 10^{-10}\text{m}$, $m \approx 1\text{u.m.a.} \approx 10^{-27}\text{kg}$, $E \approx 1\text{eV} \approx 10^{-19}\text{J}$, $q \approx 10^{-19}\text{C}$

