

**AUTORES:** CRIADO PÉREZ, A. y CRIADO G<sup>a</sup>-LEGAZ, A.M.

**TÍTULO:** Partículas y ondas en Física Atómica.

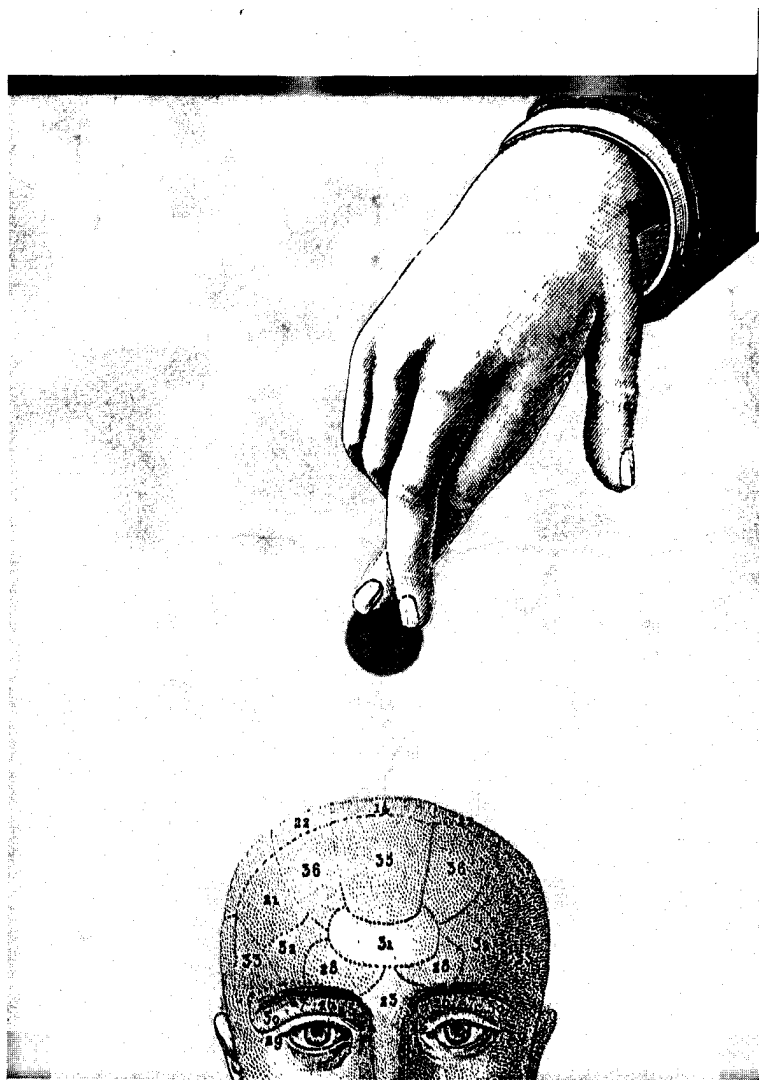
**TIPO DE PARTICIPACIÓN:**

**CONGRESO:** *X Encuentro de Didáctica de Ciencias Experimentales*

**PUBLICACIÓN:** *Actas*, pp.357-362.

**LUGAR DE CELEBRACIÓN:** E.U.M. Ciudad Real.

**AÑO:** 1989



X ENCUENTRO DE DIDACTICA  
DE LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES

◆ COLECCION  
ESTUDIOS

**Edita:** Servicio de Publicaciones de la Universidad de Castilla-La Mancha

**Director:** Juan Bravo Castillo

**Diseño Portada y Colección:** García Jiménez

**Coordinación:** Centro de Investigaciones de la Imagen (C.I.D.I)

**Realización:** PEREA Ediciones.

**I.S.B.N.:** 84-7729-067-9

**Depósito Legal:** CU-296-1990

# PARTICULAS Y ONDAS EN LA FISICA ATOMICA

**CRIADO PEREZ, A.; PLAZA AGUILERA, R.;  
CRIADO GARCIA-LEGAZ, A.**

En este apartado del modelo didáctico se pretende analizar la naturaleza dual de la materia y la radiación, y conectar esta dualidad con las características básicas de la Física Atómica (F.A.) de escala (A, U.M.A., eV): «cuantificación» y «probabilismo», los cuales son el fundamento del funcionamiento de los componentes utilizados en informática y robótica. Se utiliza un mínimo de recursos matemáticos, usando en forma prioritaria la intuición física; todo ello expuesto en forma concisa dada la obligada brevedad.

## INTRODUCCION

La Física Clásica (F.C.), de escala macroscópica (m, Kg, J), utiliza dos clases de descripciones: Corpuscular y Ondulatoria, mutuamente excluyentes, y distingue entre dos tipos principales de entes físicos: materia y radiación. La materia está constituida por partículas, con masa en reposo no nula, portadoras de los observables,  $m$ ,  $\vec{p}$ ,  $\xi$  y  $q$ . Las partículas perturban el espacio que las rodea generando campos: gravitatorio,  $G$ , y electromagnético,  $E$  y  $\vec{B}$ , originándose interacciones entre estos campos y las partículas. La radiación es una perturbación ondulatoria, propagación de oscilaciones de  $\vec{E}$  y de  $\vec{B}$ , que pueden interferir, según predijo Maxwell y verificó Hertz. En la F.C., en general, los valores de las magnitudes físicas, varían con continuidad. Los

sistemas físicos, en iguales condiciones iniciales y de interacción, evolucionan unívocamente. En este sentido, se afirma que la F.C. es «continuista y determinista». A comienzos de este siglo, alborea la F.A. Las experiencias de Thomson y Millikan prueban el carácter discreto de la carga; su unidad negativa es el electrón. En 1900 y en 1905 se formulan las teorías «Cuántica» y de la «Relatividad» por Planck y Einstein respectivamente. La primera completada en 1924, con la «Dualidad onda-corpúsculo» y en el 1927 el «Principio de Indeterminación» por L. de Broglie y Heisenberg.

Planck postuló el carácter finito de la acción,  $S$ , que varía por múltiplos de  $h$ . La finitud de  $S$ , obliga a que los micro-osciladores emitan o absorban radiación en cantidades discretas de energía, denominadas «cuantos»,  $\Delta S = nh = \xi T$ ,  $\gamma = 1/T$ :  $\xi = nh\gamma$ . Planck se vio obligado a formular este postulado al pretender deducir la ley que refleja los resultados del análisis experimental de la radiación emitida por el cuerpo negro, deducción que implicaba graves incoherencias en el supuesto de una emisión y absorción en forma continua.

## CARACTER DUAL DE LA RADIACION

La TC inicialmente propuesta para explicar la emisión y absorción de la radiación por la materia ha llegado a constituir una cualidad inherente de aquélla y explica su comportamiento. Veamos dos ejemplos significativos: 1) Efecto fotoeléctrico: al iluminar con radiación, de frecuencia  $\gamma$  e intensidad  $I$  ( $I = \xi_0 c E_e^2 w/m^2$ ), el cátodo metálico de un diodo de vacío, el metal emite electrones que originan una corriente foto-electrónica: a) el fenómeno es instantáneo, lo cual es incompatible con el retraso que conllevaría la acumulación por el  $e^-$  de la energía distribuida en el frente de onda. b) Que se produzca o no la fotocorriente no depende de  $I$ ; su existencia sólo es posible si es  $\gamma > \gamma_0$ ,  $\gamma_0$  es una cte. específica del metal. c) La energía cinética del  $e^-$  extraído es función lineal de la frecuencia radiante,  $mv^2/2 = h\gamma - h\gamma_0$ . La intensidad máxima de la corriente fotoelectrónica es proporcional a  $I$ . El efecto fotoeléctrico se interpreta como sigue: la energía de los fotones  $h\gamma$  se utiliza en realizar un trabajo,  $h\gamma_0$ , de extracción del electrón del metal, y en comunicarle energía cinética; el proceso es discreto e instantáneo.  $I$  es proporcional al número de fotones, y por consiguiente, al número de electrones extraídos,  $Nh\gamma = I = \xi_0 c E_e^2 = Ne^-$ . 2). Efecto Compton: al irradiar con rayos X una sustancia que contiene electrones débilmente ligados, los rayos X dispersados en ángulo  $\theta$ , independientemente de la sustancia, incrementan su longitud de onda según la ley,  $\Delta \lambda = h(1 - \cos \theta)/m_e c$ . Esta fórmula se deduce admitiendo que se produce un choque elástico entre el electrón semilibre y el fotón incidente, el cual cede parte de su energía y de su impulso al electrón. El momento lineal del fotón es:  $mc = mc^2/c = h \gamma/c = \hbar/\lambda = hk$ ;  $h = h/2\pi$ .

La necesidad de hacer compatible para las radiaciones sus propiedades

de onda (interferencia, difracción,  $I = \xi_0 c E_e^2$ , ...) y la existencia de los fotones ( $\xi = n\omega$ ,  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ ) obligó a postular su naturaleza dual: «la radiación está compuesta de fotones que se propagan utilizando como vehículo una onda electromagnética. El flujo  $N$ , observado en cada punto por emisión, absorción o impacto, es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda en ese punto:  $Nh\gamma = \xi_0 c E_e^2$ .

## CARACTER DUAL DE LA MATERIA

L. de Broglie formuló una hipótesis revolucionaria (h. de B.): «Las micro-partículas móviles llevan adscritas una onda material,  $\Psi$  que actúa como vehículo en su propagación. Los parámetros de  $\Psi$  son:  $\xi = h\omega$ ,  $\vec{p} = \hbar\vec{k}$  ( $\lambda = h/p$ )». Broglie fundamentó su hipótesis en: a) la simetría formal entre la óptica y la mecánica (principios extremales de Fermat y Hamilton); b) analogía formal con la dualidad de las radiaciones. La h. de B. fue experimentalmente verificada por la difracción de electrones ( $\lambda \approx \text{\AA}$ ) en un cristal, análogamente a como lo hacen los rayos X, y por difracción de protones, neutrones..., al atravesar finísimas láminas metálicas. Schrödinger, basándose en la ecuación de ondas y en la energía mecánica,  $\xi = (p^2/2m) + V$ , formuló su célebre ecuación (e. de S.), que permite determinar  $\Psi$  para un determinado sistema. Posteriormente, Dirac generaliza la e. de S. para recintos de validez de la relatividad ( $v \approx c$ , creación y aniquilación de partículas materiales), encontrando como posibles soluciones de su ecuación la existencia de antipartículas. Inspirado en la analogía de la dualidad de la radiación, Max Born dio el significado físico de  $\Psi$ : «La probabilidad de observar una partícula, en un instante  $t$ , en un volumen elemental,  $dV(\vec{r})$ , es proporcional al cuadrado de la amplitud de  $\Psi$ . Veremos que el principio de indeterminación, que impide la evolución cinemática y dinámica de la partícula, está de acuerdo con el carácter probabilístico de  $\Psi$ . De acuerdo con lo indicado, el objetivo de la Mecánica Cuántica es obtener  $\Psi$  para cada sistema, y de ésta determinar: a) los valores posibles de los observables. b) La probabilidad de que cada uno de estos valores sea el resultado de una medición. c) Unívoca.

## CUANTIFICACION (ESTADOS LIBRES Y ESTADOS LIGADOS)

Consideremos un caso trivial: un electrón moviéndose sobre el eje X:

a) En el estado libre o no ligado, su abscisa  $x$  verifica  $-\infty < x < \infty$ . Distingamos dos casos: a<sub>1</sub>) Su momento,  $p_0$ , está determinado,  $\Delta P = 0$ ,  $\xi = P_0^2/2m$ .  $\Psi$  es una onda plana:  $\Psi(x,t) = A \exp [i(K_0x - \omega_0t)] = A \exp [i(p_0x - \xi_0t)/\hbar]$ . La probabilidad de que sea  $x$  la abscisa del electrón es cte. en todo el eje X,  $[\Psi^2] = A^2$ , su incertidumbre es  $\Delta x = \infty$ . a<sub>2</sub>) Su momento  $p$  no está bien determinado,  $p_0 - (\Delta p/2) < p < p_0 + (\Delta p/2)$ ,  $\Delta p = 0$ .  $\Psi$  es una

combinación lineal de ondas planas de distintos momentos, «paquete de ondas»,

$$\Psi(x,t) = \int_{p_0 - \Delta p/2}^{p_0 + \Delta p/2} A(p) \exp [i(px - \xi t)/\hbar] dp$$

De los resultados obtenidos en la primera parte se sigue que, en un instante dado,  $\Psi$  es nula en todo el eje  $X$  excepto en un intervalo de extensión  $\Delta x$  y se verifica:  $\Delta x \cdot \Delta k = \Delta x \cdot \Delta(2\pi/\lambda) \approx \pi \cdot \Delta x \cdot \Delta p \approx h$ . Esto es, la determinación simultánea de la posición y del momento conlleva unas incertidumbres  $\Delta x$  y  $\Delta p$  que verifican  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ , de acuerdo con el principio de indeterminación de Heisenberg. b) En el estado ligado el electrón se mueve dentro del intervalo  $0 \leq x \leq a$ . Físicamente se encuentra en el interior de un pozo de potencial de paredes reflectoras:  $x < 0, \xi_p = \infty$ ;  $0 \leq x \leq a, \xi_p = 0, \xi_c = p^2/2m$ ;  $x > 0, \xi_p = \infty$ . Las ondas materiales se reflejan, análogamente a lo que ocurría en el caso de la cuerda vibrante fija por sus extremos. Se origina un conjunto numerable de ondas estacionarias  $\Psi(x,t) = A_n \sin(n\pi x/a) \cdot \exp(i\xi_n t/\hbar)$ ,  $p$  y  $\xi$  están cuantificados:  $p_n = \hbar k_n = nh/2a$ ,  $\xi_n = p_n^2/2m = n^2 h^2/8ma^2$ . Aproximadamente podemos verificar el principio de indeterminación:  $\Delta p = p - (-p) = 2p$ ,  $\Delta x = a$ ,  $\Delta x \cdot \Delta p = a \cdot h/a = h$ . Estos resultados se pueden probar que son generales: «En los estados libres/ligados de un micro-sistema, los valores de sus magnitudes físicas constituyen espectros continuos/discretos». Estudiando el electrón ligado, posicionado en coordenadas esféricas, y mediante la e. de S., se obtiene un conjunto de ondas estacionarias triplemente numerables mediante tres números cuánticos:  $n, l$  y  $m$ . La interpretación de los espectros de  $H$  (por Bohr y Sommerfeld), de rayos X por Moseley, las experiencias de Franck-Hertz y de Stern-Gerlach son significativos ejemplos de la cuantificación de las magnitudes correspondientes a los estados ligados.

## INDETERMINACION Y PROBABILISMO

A escala de F.A., al medir un observable, se produce una perturbación, «inevitable e imprevisible», en algunas otras magnitudes del sistema. La finitud de la acción,  $\Delta S = nh$ , y la naturaleza dual de las partículas, implican que las magnitudes del sistema se agrupan por pares, tales que el producto de las dos correspondientes a cada par, denominados «observables conjugados», tiene dimensiones de acción:  $q_i$  y  $p_i$ ,  $\delta p_i \cdot dq_i = \Delta S = nh$ . Verificándose el Principio de Heisenberg: «El producto de las incertidumbres generadas en la medida simultánea de las magnitudes de cada par de observables conjugados, tiene por límite inferior  $h$ »:  $\Delta q_i \cdot \Delta p_i \geq \hbar$ ;  $\Delta x \cdot \Delta p \geq h$ ,  $\Delta W_x \cdot \Delta L_x \geq \hbar$ ,  $\Delta t \cdot \Delta \xi \geq h$ .... Veamos algunos ejemplos triviales de la verificación de este principio: a) Al movimiento monodimensional y libre de un electrón,  $\vec{p} = (p_0, 0, 0)$ ,  $\Delta \vec{p} = 0$ , le corresponde una onda material plana que ocupa una

extensión infinita; cuando el momento lineal  $p$  forma un espectro continuo de momentos,  $p_0 - (\Delta p/2) \leq p \leq p_0 + (\Delta p/2)$ ,  $\Psi$  es un paquete de ondas que ocupa una extensión  $\Delta x$  tal que  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$ . b) A un electrón de un haz monocinético,  $\vec{p} = (0, \vec{p}_0, 0)$ ,  $\Delta p = 0$  y coordenadas indeterminadas se le pretende medir su abscisa  $x$  mediante una pantalla,  $y = 0$ , provista de una ranura paralela al eje  $Z$ , situada en  $x$  y de anchura  $\Delta x$ . Los electrones que pasan por la ranura, tienen abscisa  $x$  con incertidumbre  $\Delta x$ . Antes de que se produzca el paso, al electrón le corresponde una onda plana,  $\vec{k} = i2\pi/\lambda = \vec{p}/\hbar$ , que se difracta al pasar por la ranura y su nueva superficie de ondas tiene, aproximadamente, forma cilíndrica, con su eje situado en la ranura y semiángulo  $\theta$ ; se verifica:  $\lambda = \Delta x \cdot \text{sen } \theta \approx \Delta x \cdot \theta$ , originándose una nueva componente de  $\vec{p}$   $\Delta p_x = p \cdot \text{sen } \theta \approx p \cdot \theta = (h/\lambda) \cdot (\lambda/\Delta x) = h/\Delta x$ .  $\Delta x \cdot \Delta p_x \approx h$ .

La indeterminación en la F.A. es independiente tanto de los posibles errores de medida como de la complejidad de los datos correspondientes a un colectivo muy numeroso, como ocurre en Mecánica Estadística. En F.A. la indeterminación es de naturaleza intrínseca, inevitable e imprevisible, por muy preciso que sea el aparato de medida y por muy sencillo que sea el sistema, p.e. una sola partícula. El conocimiento que nos proporciona  $\Psi$  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, p.e., un conjunto de núcleos radiactivos, en iguales condiciones físico-químicas, se desintegran en instantes distintos; el valor del número,  $N(t)$ , de núcleos no desintegrados en el instante  $t$ , obedece a la ley,  $N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda t)$  y por el contrario, la medida de la duración de supervivencia de un núcleo determinado sólo es previsible con cierta probabilidad.