

¿Efecto fotoeléctrico sin fotones?

En muchas ocasiones se suele sugerir que el efecto fotoeléctrico constituye una evidencia del carácter corpuscular de la luz (fotones) o, en otras palabras, de la naturaleza cuántica de la radiación. Las características del efecto fotoeléctrico que avalarían dicha conclusión serían:

- (a) Existencia de una frecuencia mínima de la luz para que exista efecto fotoeléctrico
- (b) Existencia de una energía cinética máxima para los electrones liberados
- (c) Ausencia de retardo entre la iluminación y la liberación de electrones por muy baja que sea la intensidad de la luz.

En estas notas se pretende mostrar que estas propiedades no aportan evidencia de la existencia de fotones. La razón es que es posible explicar estas propiedades en términos de la cuantificación de la materia (no de la luz) y del conocido fenómeno de resonancia, de aplicación tanto en el dominio cuántico como en el clásico. Dicho de otra forma, una teoría semiclásica en la que la materia se describe cuánticamente y la luz clásicamente, es suficiente para explicar el efecto fotoeléctrico.

Bajo condiciones muy generales el Hamiltoniano de interacción entre la radiación y la materia (por ejemplo un átomo) es de la forma $H_{\text{int}} \propto \xi \wp$ donde ξ es el campo eléctrico y \wp es el momento dipolar atómico. Esta expresión para la interacción es válida tanto clásica como cuánticamente. En cualquier caso, la interacción $H_{\text{int}} \propto \xi \wp$ sólo es efectiva si hay resonancia, es decir si la frecuencia de la luz ω es aproximadamente igual a la frecuencia propia ω_0 de evolución del momento dipolar \wp . La idea de resonancia es muy usada en física clásica, usualmente ilustrada mediante la dinámica de un oscilador armónico forzado al que sólo es posible comunicarle energía en resonancia.

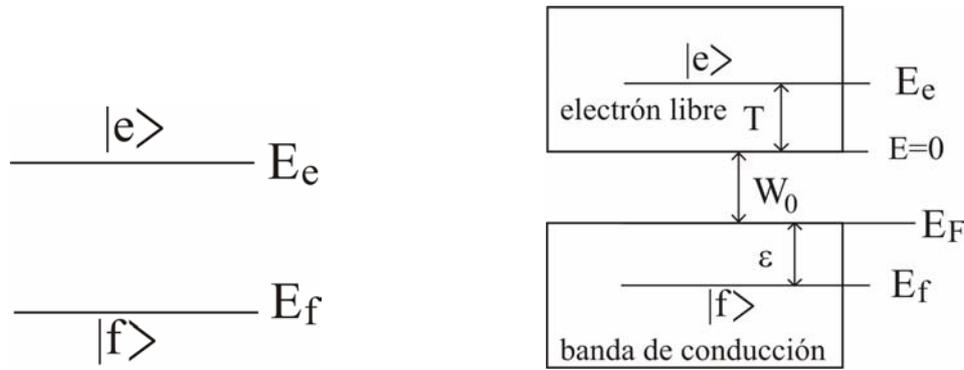
La idea de resonancia se aplica muy bien a este problema puesto que normalmente la interacción radiación materia es suficientemente débil como para que la luz y la materia conserven casi inalteradas sus frecuencias de evolución propias, frecuencias que son de hecho enormemente elevadas $\approx 10^{15}$ Hz. En tal caso si las frecuencias propias de evolución de ξ y \wp no son muy parecidas, H_{int} varía muy rápidamente en el tiempo y su efecto se promedia a cero al integrar las ecuaciones de evolución. Sólo si $\omega \cong \omega_0$ (resonancia) ocurre que H_{int} tiene una parte constante o lentamente variable para que su efecto acumulado a lo largo del tiempo pueda alterar la dinámica de la luz y de la materia.

Por ejemplo, para el caso de dos niveles atómicos $|e\rangle$ y $|f\rangle$ esquematizados en la figura la ecuación de Schroedinger $i \frac{\partial}{\partial t} \psi = H \psi$ implica que en ausencia de interacción los estados $|e\rangle$ y $|f\rangle$ evolucionan en la forma

$$|e(t)\rangle = e^{-iE_e t / \hbar} |e(0)\rangle \quad |f(t)\rangle = e^{-iE_f t / \hbar} |f(0)\rangle$$

donde E_e y E_f son las energías de los correspondientes niveles atómicos. La frecuencia propia ω_0 de evolución del momento dipolar $\langle \psi(t) | \wp | \psi(t) \rangle$ aislado sólo puede ser (salvo términos constantes debidos a momentos dipolares permanentes que no afectan a este análisis)

$$\omega_0 = \frac{E_e - E_f}{\hbar}$$



La conclusión es que sólo hay transiciones entre \$|e\rangle\$ y \$|f\rangle\$ si la frecuencia de la luz satisface que

$$\omega \cong \omega_0 = \frac{E_e - E_f}{\hbar}$$

Nótese que en esta condición de resonancia la constante de Planck es aportada por la materia, no por la luz, vía la conversión de energías en frecuencias a través de la ecuación de Schroedinger.

En el caso del efecto fotoeléctrico, estrictamente hablando no tenemos transiciones entre dos niveles atómicos, sino entre dos bandas esquematizadas en la figura. La banda superior corresponde al electrón libre y la banda inferior a la banda de conducción del metal. Aunque difieren en algunos detalles, formalmente este caso es el mismo de los dos niveles. Habrá transiciones entre las bandas (es decir se liberarán electrones) a condición de que la frecuencia de la luz coincida con la frecuencia propia determinada por un nivel de la banda superior y otro de la inferior

$$\omega \cong \omega_0 = \frac{E_e - E_f}{\hbar} = \frac{T + W_0 + \epsilon}{\hbar}$$

donde \$T\$ es la energía cinética, \$W_0\$ es la distancia en energía desde el nivel de Fermi \$E_F\$ (último nivel ocupado por electrones) al nivel de vacío y \$\epsilon\$ es la profundidad del nivel con respecto al borde superior de la banda de conducción. En este caso como \$T\$ y \$\epsilon\$ son variables habrá muchas frecuencias luminosas que puedan verificar la condición de resonancia dependiendo de la energía cinética de los electrones arrancados y de lo profundo que se encuentre el electrón en la banda de conducción. La probabilidad de que un electrón escale en energías desde \$E_F\$ hasta la libertad a base de transiciones consecutivas a niveles energéticos próximos parece altamente improbable de forma que el paso del estado ligado y el libre debe hacerse en una sola transición.

La frecuencia mínima de la luz para la que se puede producir efecto fotoeléctrico ocurrirá cuando \$T = \epsilon = 0\$ dando lugar a \$\omega_{min} = \frac{W_0}{\hbar}\$, que es la propiedad (a) con el mismo valor predicho por la hipótesis corpuscular.

La propiedad (b) emerge al preguntarnos por la energía cinética máxima \$T_{max}\$ para una frecuencia fija de iluminación \$\omega\$. La máxima energía cinética se obtendrá si \$\epsilon = 0\$ en cuyo caso \$T_{max} = \hbar(\omega - \omega_{min})\$, siempre que \$\omega > \omega_{min}\$, resultado que coincide también con el predicho por la hipótesis corpuscular de la luz.

El análisis de la propiedad (c) es un poco más complejo pero también parece admitir una explicación semiclásica. Tanto si describimos la luz clásicamente como cuánticamente, el Hamiltoniano \$H_{int} \propto \xi \varphi\$ produce una transición continua en el tiempo entre el nivel fundamental y el excitado. *Grosso modo* el estado atómico evoluciona en la forma

$$\cos(\Omega t)|f\rangle + \sin(\Omega t)|e\rangle$$

La velocidad de la transición \$\Omega\$ es proporcional en ambos casos (luz clásica o luz cuántica) a la intensidad de la luz. La conclusión es que en ambos casos (luz clásica o luz cuántica) el carácter

cuántico de la materia permite que se puedan producir fotoemisiones inmediatamente después de la iluminación con probabilidad $\sin^2(\Omega t)$, aunque no haya transcurrido tiempo suficiente para que sobre el átomo haya incidido una cantidad de energía $\hbar\omega$. Con respecto a una posible falta de conservación de la energía podemos invocar que el estado inicial del sistema luz y átomo no tiene una energía definida (de otro modo sería un estado estacionario y no habría evolución) por lo que sólo puede esperarse conservación de la energía en promedio, lo mismo en el caso cuántico que en el semiclásico. En cualquier caso las ecuaciones de evolución semiclásicas garantizan la conservación de la energía.

En definitiva, parece que ninguna de las propiedades del efecto fotoeléctrico señaladas arriba requiere la cuantificación de la luz y pueden explicarse con el modelo puramente clásico de la radiación, sin invocar la existencia de fotones.

Por ello, sería más correcto concluir que el efecto fotoeléctrico demuestra que la materia extrae de la radiación energía en paquetes de valor $\hbar\omega$, lo cual no es equivalente a que tales paquetes de energía sean una propiedad de la luz. Por buscar una analogía, el hecho de que una ráfaga de viento derribe siempre una cantidad numerable de árboles no implica necesariamente que el viento tenga una naturaleza corpuscular.

Quizás la explicación del efecto fotoeléctrico en términos de fotones sea más sencilla y elegante, pero, como hemos visto aquí, no es (estrictamente) necesaria. En el contexto de la óptica cuántica se suele dar mucho valor a los fenómenos que pongan de manifiesto de forma inequívoca la naturaleza cuántica de la radiación, puesto que son los que justifican la existencia de la óptica cuántica. Esto implica que han de resistir cualquier análisis o explicación en términos de conceptos clásicos, al margen de la dificultad o sencillez de tales explicaciones alternativas.

Alfredo Luis Aina, Isabel Gonzalo Fonrodona
Departamento de Óptica
Universidad Complutense
enero 2006

Bibliografía

M. O. Scully y M. Sargent III, *The concept of the photon*, Physics Today, p.38 marzo 1972

R. Q. Stanley, *Question # 45. What (if anything) does the photoelectric effect teach us?*
American Journal of Physics Vol. 64 n° 7 p. 839, julio 1996

P.W. Milonni, *Answer to Question # 45. What (if anything) does the photoelectric effect teach us?*
American Journal of Physics Vol. 65 n° 1 p. 11, enero 1997

H. Paul, *Introduction to quantum optics*, Cambridge University Press, § 5.3, 2004.

A. Muthukrishnan, M. O. Scully, y M. S. Zubairy, *The concept of the photon—revisited*
Optics and Photonics News Trends—The Nature of Light: What Is a Photon? p. S-18 octubre 2003,
<http://www.osa-opn.org/abstract.cfm?URI=OPN-14-10-49>

A. Zajonc, *Light reconsidered*
Optics and Photonics News Trends—The Nature of Light: What Is a Photon? p. S-2 octubre 2003,
<http://www.osa-opn.org/abstract.cfm?URI=OPN-14-10-49>

L. Mandel, *The case for and against semiclassical radiation theory*, Progress in Optics Vol. XIII, p. 27, 1976.

A. Cives-Esclop et al. *Influence of field dynamics on Rabi oscillations: Beyond the standard semiclassical Jaynes-Cumming model*, Journal of Modern Optics, vol. 46, p.639, 1999.