TEMA 2
INTERACCIÓN DE LA RADIACION CON LA MATERIA

Miguel Alcaraz Baños

Objetivos generales

1. Explicar el efecto fotoeléctrico y su relación con la energía de la radiación y con el número atómico de los átomos del medio.
2. Explicar el efecto Compton y su relación con el número atómico de los átomos del medio.
3. Establecer la relación del efecto Compton con la energía de los fotones.
4. Definir cualitativamente el número atómico efectivo.
5. Discutir la distinta penetración de estructuras por los rayos X en función del número atómico efectivo y la densidad de los tejidos humanos (adiposo, óseo, muscular), y de las sustancias de contraste (bario, yodo).
6. Discutir cómo se relacionan la absorción fotoeléctrica con el contraste de la imagen y la absorción de energía en el paciente.
7. Discutir como se relaciona la dispersión Compton con el contraste de la imagen y la absorción de energía en el paciente, así como con la radiación dispersa de la sala.
8. Especificar cómo la atenuación de un haz puede deberse a un proceso de absorción o a un proceso de dispersión.

TEMA 2
INTERACCIÓN DE LA RADIACIÓN CON LA MATERIA

Miguel Alcaraz Baños

El mecanismo de absorción de la radiación (fotones) por la materia es complejo ya que resulta de la superposición de varios procesos independientes. Cuando un haz de fotones interacciona con el tejido del paciente, pueden ocurrir tres situaciones diferentes:

1. Que atraviese al paciente sin interaccionar con ningún átomo de éste: no depositará en él ninguna energía, y no producirá en él ningún efecto; aunque alcanzará la película radiográfica.

2. Que colisione con alguno de los electrones corticales de los átomos del paciente, cediéndole toda la energía que transporta, y desapareciendo porque ha sido completamente absorbido: **Efecto fotoeléctrico**

3 Que colisione con alguno de los electrones corticales de los átomos del paciente, cediéndole sólo una parte de la energía que transporta, continuando su camino aunque cambiando de trayectoria e interaccionando con todo lo que se interponga en su camino: **Efecto Compton.**

2.1 Efecto Fotoeléctrico

El efecto fotoeléctrico se produce cuando tiene lugar una colisión entre un fotón de la radiación incidente y un electrón cortical de un átomo del material absorbente. En este impacto, o interacción, el fotón incidente de radiación cede toda su energía, por lo que es completamente absorbido y desaparece. A este efecto se le denomina **efecto fotoeléctrico**, y es el efecto **deseado** para obtener una buena imagen radiológica; aunque implica la absorción de esa energía del fotón de radiación, y por ello, un posible efecto biológico sobre el paciente.

En el átomo del material absorbente (el paciente en nuestro caso), que ha recibido este impacto del fotón de radiación incidente pueden ocurrir varias cosas:

1.- Que el fotón incidente ceda toda su energía en el impacto contra el electrón cortical del átomo del paciente, pero que la energía que le transmite es **menor** a la **energía de ligadura** que lo mantiene en su orbital: en este caso el fotón de radiación es completamente absorbido y desaparecerá (efecto fotoeléctrico). En el paciente prácticamente no ocurrirá nada ya que el electrón contra el que se colisionó volverá a su situación inicial tras perder ese exceso de energía que le cedió el fotón en su impacto (fenómeno de excitación) (Fig.2.1).

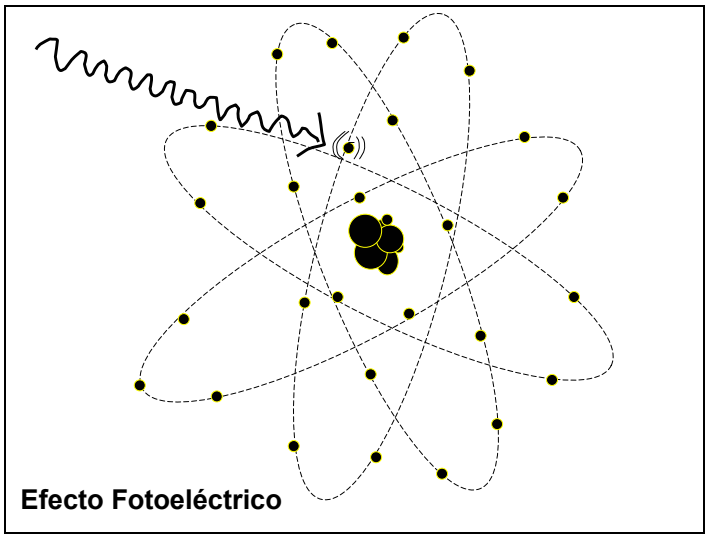


Fig. 2.1. Efecto fotoeléctrico

2.- Un caso particular del apartado anterior, es aquella situación en la que tras el impacto del fotón de radiación, éste le cede **toda** su energía al electrón cortical del paciente, pero ésta resulta ser exactamente igual a la energía de ligadura que lo mantiene en su orbital. En este caso, el fotón de radiación también es completamente absorbido (efecto fotoeléctrico), aunque en el paciente el electrón orbital es arrancado de su posición y puede salir proyectado en cualquier dirección denominándose entonces ***fotoelectrón***, Éste dejará un hueco dentro de la órbita del átomo del paciente, que supone un estado de inestabilidad y tenderá a ocuparse mediante los mecanismos de saltos orbitales de las capas más externas. En este caso particular, igualmente ocurre la absorción completa del fotón de radiación que caracteriza al efecto fotoeléctrico, aunque las posibles consecuencias para el medio absorbente (el paciente en nuestro caso), pudieran ser mayores (ionización) (Fig.2.2).

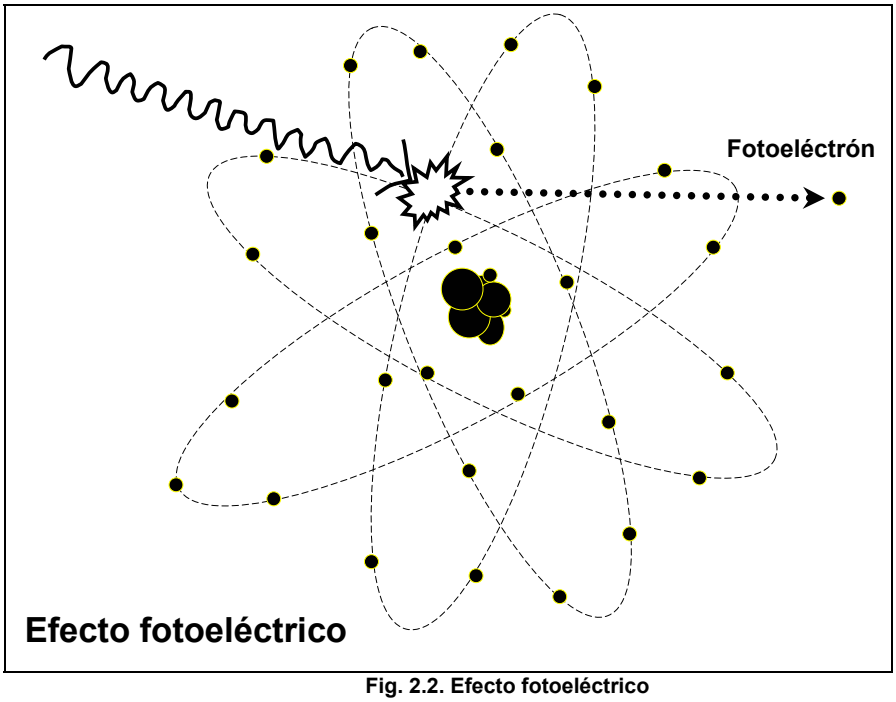


Fig. 2.2. Efecto fotoeléctrico

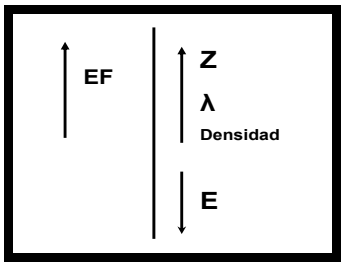
El efecto fotoeléctrico depende, por tanto, de la energía de ligadura de las distintas capas orbitales del átomo. Dado que estas energías son características de cada elemento, la atenuación o absorción de los fotones de radiación dependerá del átomo del absorbente que se exponga a la radiación.

Se puede establecer que la probabilidad de que ocurra una interacción fotoeléctrica:

1.- Aumenta de forma importante cuando aumenta el número atómico de los átomos del paciente con los que colisiona (proporcionalmente a $\mathbf{Z^3}$): cuanto más electrones corticales tiene el átomo, mayor probabilidad de que el fotón de radiación choque contra ellos y sea absorbido.

2.- Disminuye cuando aumenta la energía de los fotones (aproximadamente como $\mathbf{1/E^3}$). Por ello, disminuye rápidamente también con la disminución de la longitud de onda, en la misma proporción. Es decir, cuanto menor es la energía de los fotones del haz de radiación, mayor cantidad de fotones serán absorbidos mientras atraviesa al paciente. El efecto fotoeléctrico es una interacción característica de radiaciones de baja energía, o de radiación blanda.

3.- Es directamente proporcional a la densidad del medio: aumentará el efecto fotoeléctrico cuanto más denso sea el tejido absorbente.



La interacción fotoeléctrica es la interacción dominante con tejidos biológicos a bajas energías (por debajo de 100 keV), y es fundamental para la obtención de la imagen radiológica en radiodiagnóstico. Cuando un fotón interacciona por efecto fotoeléctrico con tejidos biológicos puede suponerse que toda su energía es depositada dentro del tejido con el que interacciona.

2.2. Efecto Compton

El efecto Compton supone una interacción de los fotones con el paciente **no deseada**, pero que resulta inevitable; siempre esta presente con las energías empleadas en el radiodiagnóstico médico.

Se trata de una interacción que se produce mayoritariamente con electrones atómicos poco ligados (los de las capas orbitales más externas). En el medio absorbente de nuestro paciente, en cada una de las colisiones, se cede ***más*** energía a los electrones corticales que la energía de ligadura que los mantiene en sus orbitales. Se producirá un arrancamiento de esos electrones de sus orbitales con los procesos de ionización y/o excitación que se han descrito anteriormente (Fig.2.3).

Como consecuencia de esta interacción Compton, en Radiología suceden dos situaciones de interés:

1.- El fotón de radiación incidente no es absorbido, sino que contínua su trayectoria tras múltiples colisiones que le provocan múltiples desviaciones de su trayectoria; ello dará lugar a la radiación dispersa que disminuirá la calidad de la imagen radiológica, y provocará el riesgo de irradiación del personal que se encuentre dentro de la sala durante la exploración radiológica.

2.- Se producirán múltiples ionizaciones en los átomos del tejido del paciente al absorberse parte de la energía de estos fotones tan energéticos; y que son la base de las teorías por las que se explican los efectos lesivos producidos por la radiación ionizante.

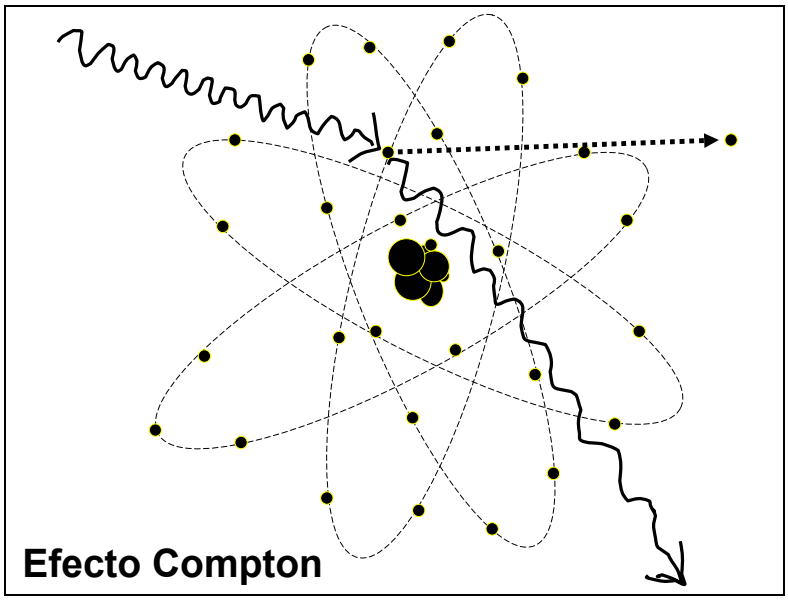


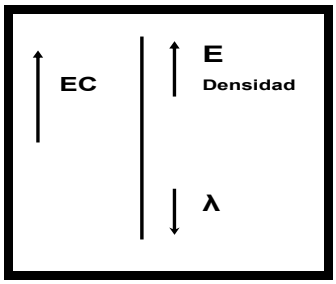
Fig. 2.3. Efecto Compton

Se puede establecer que la probabilidad de que se produzca una interacción Compton:

1.- Aumenta al aumentar la energía de los fotones. Por ello, aumenta al disminuir la longitud de onda ($1/\lambda$)

2.- Es prácticamente independiente del número atómico del material, ya que éste tiene escasa incidencia en el proceso

3.- Es proporcional a la densidad del medio: aumenta al aumentar la densidad del medio absorbente



La interacción Compton es la interacción dominante en tejidos biológicos a energías intermedias (entre 100 y 1000 keV). Por ello, las energías utilizadas en el diagnóstico radiológico tienen como límite superior energías de 150 kV, en donde el efecto fotoeléctrico en los tejidos orgánicos sería máximo, mientras que el efecto Compton se encuentra, en términos proporcionales, dentro de unos márgenes adecuados para obtener una buena calidad en la imagen radiológica.

2.3 Formación de la imagen radiológica

La energía de los fotones utilizados en radiodiagnóstico (de 20 a 150 keV) provoca procesos de interacción con los materiales biológicos que se han estudiado anteriormente: interacción fotoeléctrica e interacción Compton. La primera de ellas representa la absorción total de la energía del fotón, mientras que la interacción Compton supone la aparición de un fotón disperso de menor o igual energía que la del fotón incidente y un depósito parcial de la energía del mismo en el paciente.

La imagen radiológica convencional se forma por la interacción de los fotones de rayos X con la película radiográfica y representa, por tanto, la distribución de los fotones que han interaccionado con el paciente y han alcanzado el chasis con la película radiográfica. Esos fotones pueden ser bien los fotones que han pasado a través del paciente sin interacción con ningún átomo del paciente; o bien, los fotones originados en los procesos de interacción con el mismo paciente.

Esquemáticamente, el haz de radiación podría reducirse a tres únicos fotones en su interacción con el paciente: uno, que no colisiona con ningún átomo del tejido irradiado; y, otros dos, que al colisionar con el paciente producirán un efecto fotoeléctrico y un efecto Compton, respectivamente.

- El **primero**, atravesará sin colisionar en ningún sentido con los átomos del paciente y llegará a la película estimulando su emulsión fotográfica. Será el responsable del ennegrecimiento generalizado de la película radiológica (fondo radiotransparente) de toda la película radiográfica. Este fotón representaría al 99% de todos los fotones que salen del tubo de rayos X durante la exposición.

- El **segundo**, será el que producirá el efecto Fotoeléctrico. Será aquel fotón que al colisionar con los átomos del paciente será completamente absorbido (desaparecerá del medio), y

no llegará a excitar la emulsión fotográfica de la película radiográfica. Será el responsable de las imágenes blancas o radioopacas que se observan tras el revelado de la película.

- El **tercer** fotón sería el que produce el efecto Compton. El efecto Compton es aquel fotón que podrá colisionar una o varias veces con electrones corticales de los átomos del paciente, pero que no será totalmente absorbido. A cada colisión variará su dirección o trayectoria y podría provocar diferentes efectos:

a.- podría chocar, al desviar su trayectoria sobre un punto de la película que ya estuviera ennegrecida por que hubiera sido alcanzada previamente por otro fotón. Su efecto podría pasar desapercibido.

b.- podría alcanzar una zona que debería estar blanca o radioopaca por corresponderse con puntos en los que se ha producido efecto fotoeléctrico. En este caso, podría agrisarla o ennegrecerla hasta hacerla desaparecer completamente de la imagen ocultando las estructuras anatómicas o patológicas que produjeron la absorción de la radiación en el paciente.

c.- podría hacer cambiar su trayectoria en cualquier dirección, e incluso llegar a la retrodispersión, volviendo a la sala aumentando la radiación dispersa y provocando la irradiación de las personas que se encontrasen próximas al paciente.

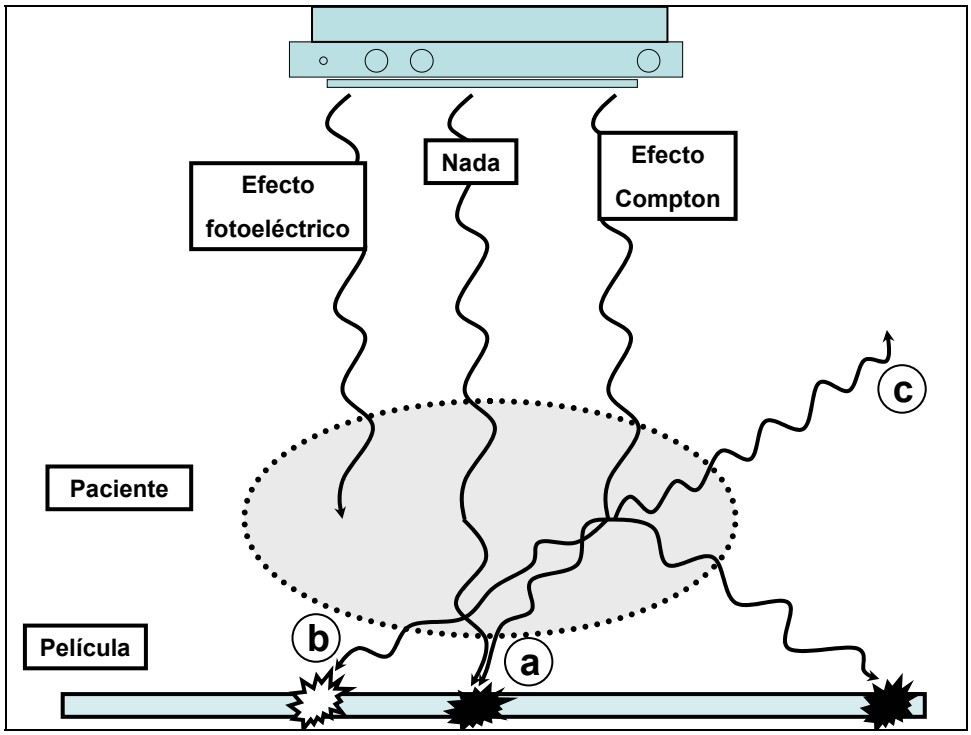


Fig. 2.4. La imagen radiológica se obtiene con tres tipos de fotones: los que atraviesan el paciente sin interaccionar con el paciente (nada), los absorbidos por efecto fotoeléctrico y los dispersados por el efecto Compton.

Así pues, la radiación dispersa esta formada por fotones dispersos originados mayoritariamente en la interacción Compton que aumenta con la energía del haz de radiación y cuanto mayor es el volumen del paciente atravesado. Pueden ser emitidos en cualquier dirección dando lugar al aumento del velo de la película radiológica que deteriora su contraste. Para evitar este deterioro se recurre a la disminución del volumen irradiado con la disminución del campo de irradiación, y al empleo de rejillas antidifusoras que pueden eliminar hasta el 80 % de la radiación dispersa en exploraciones con volúmenes grandes, como en la radiografía de tórax.

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA

ALCARAZ BAÑOS, M. (2002).- ***Bases físicas y biológicas del radiodiagnóstico médico***. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia, Murcia, (pp. 21-36).

GONZÁLEZ RICO, J. y cols.,(1996). ***Tecnología Radiológica.*** Paraninfo, Madrid (pp, 104-105)

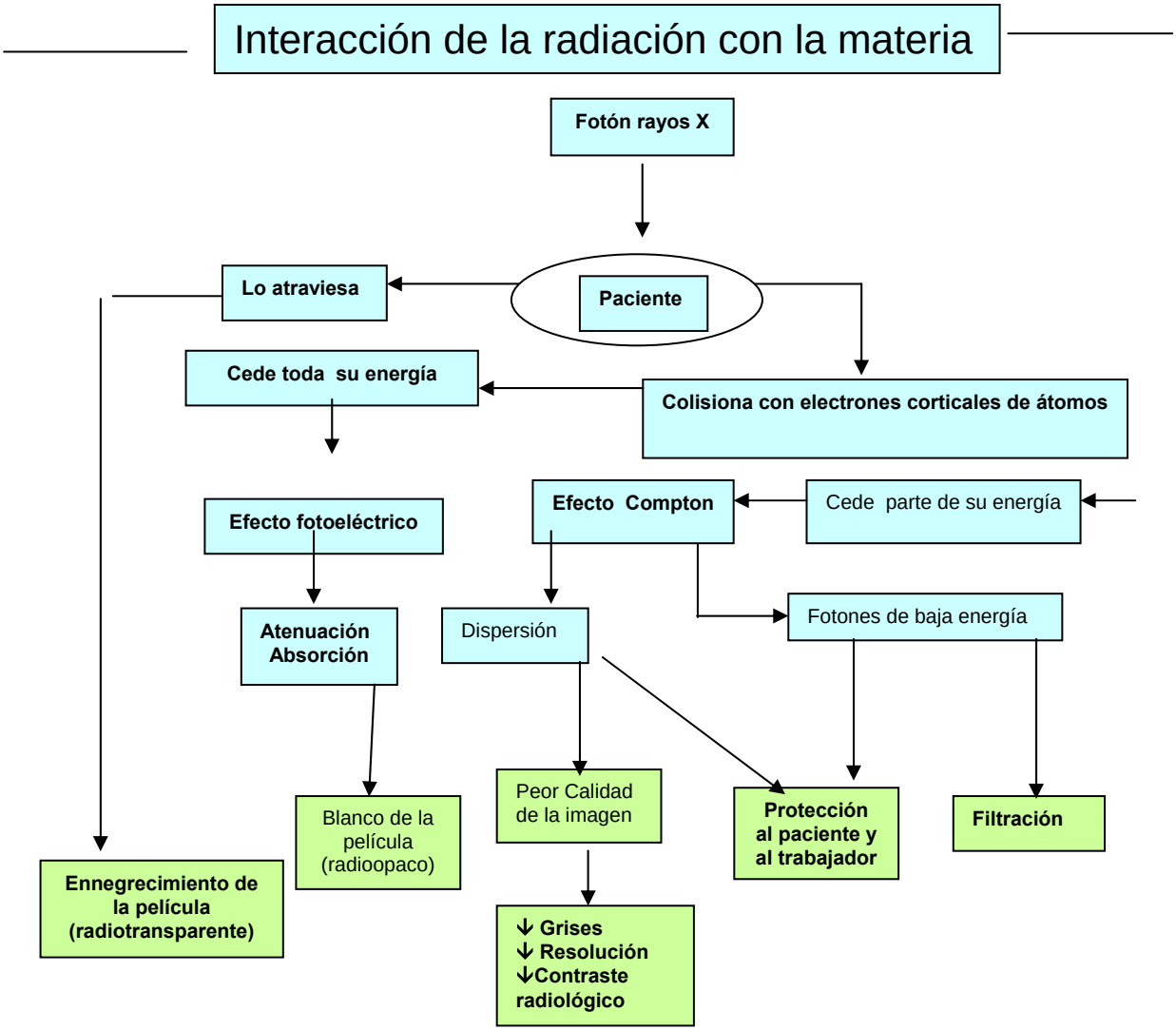


Figura 2.5. Mapa conceptual: interacción de la radiación con el paciente.