

اصول سیستم های رادیولوژی و تصویرگر پزشکی

فصل دوم: برخوردهای اساسی بین اشعه X و ماده
مدرس: حسین پورقاسم

پراکندگی

- پراکندگی اشاره به فعل و انفعالات ناشی از انحراف یک ذره یا فوتون از مسیر اصلی اش دارد.
- پدیده پراکندگی که در آن مجموع انرژی جنبشی برخورد ذرات بدون تغییر باشد را الاستیک (قابل انعطاف) می نامند.
- هنگامی که پراکندگی همراه با از دست دادن انرژی جنبشی باشد (مجموع انرژی جنبشی ذرات پراکنده شده کمتر از مقدار انرژی آنها قبل از برخورد است)، برخورد از نوع غیر قابل انعطاف است.



برخوردهای اساسی بین اشعه X و ماده

- در اثر برخورد یک فوتون اشعه X با ماده ۴ اتفاق ممکن است بیفتد:
- ۱- پراکندگی همدوس Coherent scattering
- ۲- اثر فتوالکتریک Photoelectric effect
- ۳- پراکندگی کمپتون Compton scattering
- ۴- تولید جفت Pair production
- فوتونهایی که جذب ماده می‌شوند بطور کلی حذف می‌گردند و فوتونهایی که پراکنده می‌شوند باعث نویز در تصویر می‌شوند.

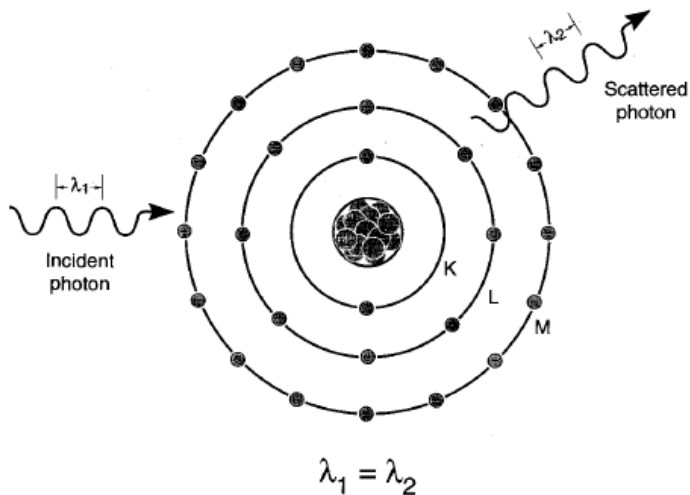


۱- پراکندگی همدوس

- آن دسته برخوردهایی که بدون هیچ تغییری در طول موج پرتو، فقط جهت آنرا تغییر می‌دهند را پراکندگی همدوس می‌گویند.
- دو نوع پراکندگی تامسون و پراکندگی ریلی وجود دارد.
- در پراکندگی تامسون یک الکترون منفرد در برخورد شرکت می‌کنند ولی در پراکندگی ریلی تمام الکترونهای یک اتم در برخورد شرکت دارند.
- این برخورد به طور عمده در اشعه ایکس برای نمونه در ماموگرافی که انرژی اشعه ایکس بین ۱۵ تا ۳۰ کیلوالکترون ولت است، اتفاق می‌افتد.
- اشعه با انرژی کم به الکترونهای یک اتم برخورد کرده و آنها را با فرکانسی معادل فرکانس خود به نوسان در می‌آورد. در طول یک پراکندگی ریلی، میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی فوتون تابشی، انرژی خود را مصرف کرده و منجر به نوسان تمام الکترونهای اتم می‌شود.
- الکترون اتم می‌تواند این انرژی را به شکل انرژی تابشی منتشر کند که نتیجه آن انتشار یک فوتون با انرژی مشابه اما در جهات مختلف است.



۱- پراکندگی همدوس



۲- اثر فتوالکتریک

- یک فوتون با انرژی کمی بیشتر از انرژی همبستگی یک الکترون لایه k به یکی از الکترونهاى این مدار برخورد کرده و باعث خروج آن الکترون می‌شود.
- الکترون آزاد شده با انرژی فوتونی که به آن برخورد کرده، حرکت می‌کند و چونکه یک ذره باردار قدرت نفوذ کمی دارد، سریع جذب ماده می‌شود. اتم که یک الکترون در لایه k کم دارد نیز یک الکترون از لایه کناری به آن منتقل می‌شود که در اثر این جابجایی مقداری انرژی بصورت فوتون اشعه X تولید می‌گردد که به این اشعه، اشعه اختصاصی می‌گویند. به این پدیده اثر فتوالکتریک می‌گویند.
- احتمال وقوع پدیده فتوالکتریک با توان سوم انرژی فوتون رابطه عکس و با توان سوم عدد اتمی رابطه مستقیم دارد.

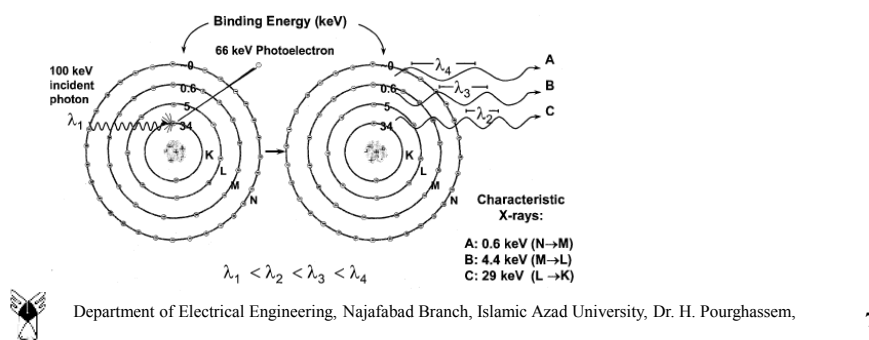
$$\frac{1}{(\text{energy})^3} \sim \text{Photoelectric effect}$$

$$(\text{Atomic number})^3 \sim \text{Photoelectric effect}$$



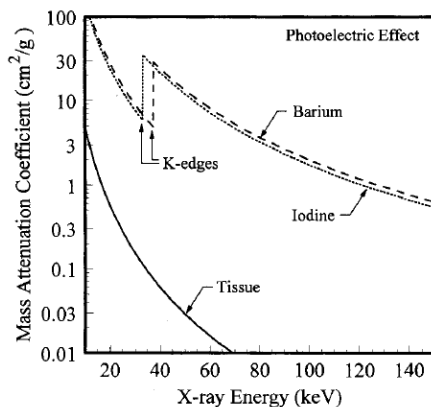
۲- اثر فتوالکتریک

- در پدیده فتوالکتریک تمام انرژی فوتون تابشی به الکترونی که از اتم ماده خارج شده منتقل می‌شود.
- جای خالی الکترون به وسیله الکترونی از لایه‌ایی با انرژی وابستگی کمتر پر خواهد شد. بنابراین یک آبشار الکترونی حاصل از انتقال الکترون‌ها از لایه‌های بیرونی به لایه‌های درونی اتم پدید می‌آید.



۲- اثر فتوالکتریک

- اگرچه احتمال اثر فتوالکتریک با افزایش انرژی فوتون کاهش می‌یابد. اما استثنایی نیز در این مورد وجود دارد. برای هر عنصر یک گراف احتمال رخداد اثر فتوالکتریک بر اساس انرژی فوتون وجود دارد.

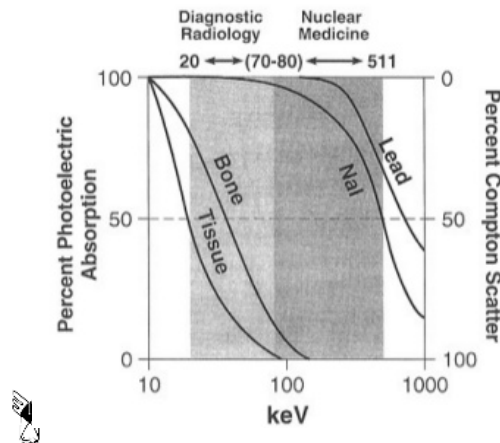


amic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

8

۲- اثر فتوالکتریک

- اثر فتوالکتریک هنگامی که فوتون‌ها کم انرژی و اتم ماده دارای عدد اتمی بالایی است، برخورد غالب محسوب می‌شود و برخورد کمیتون در بیشتر فوتون‌ها با انرژی در محدوده اشعه ایکس تشخیصی و در موادی که عدد اتمی پایینی دارند، برخورد غالب است.



mic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

9

کاربرد اثر فتوالکتریک در رادیولوژی تشخیصی

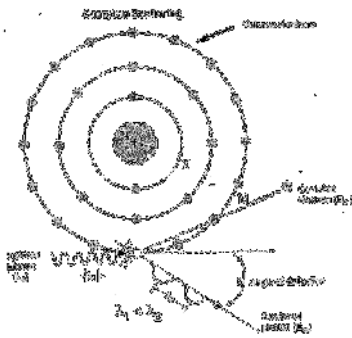
- از دو جنبه می‌توان اثر فتوالکتریک را بر روی تصاویر رادیولوژی بررسی کرد.
- جنبه خوب آن این است که اثر فتوالکتریک باعث بهبود کیفیت تصویر می‌شود. بهبود کیفیت تصویر به دو دلیل است: اول اینکه اثر فتوالکتریک ایجاد پرتو اسکتر نمی‌کند.
- دوم اینکه با توجه به اینکه مقدار اشعه‌های فتوالکتریک با عدد اتمی به توان سوم نسبت مستقیم دارد. بنابراین در بافتهای با عناصر مختلف، اثر فتوالکتریک باعث بهبود کنتراست تصویر می‌شود.
- جنبه بد این اثر این است که باعث افزایش تابش اشعه X به بیمار می‌گردد.



Department of Electrical Engineering, Najafanad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

10

۳- پراکندگی کمپتون (پراکندگی غیر قابل انعطاف)



(تغییر در طول موج)

$$\Delta\lambda = 0.024(1 - \cos\theta)$$

θ زاویه انحراف فوتون

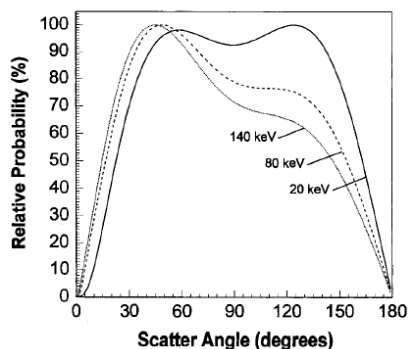
- در رادیولوژی بافت نرم معمولاً تمام پرتوهای پراکنده شده از نوع کمپتون است.
- پراکندگی کمپتون تا محدوده انرژی ۳۰ کیلو الکترون ولت، برخورد غالب در اشعه ایکس و گاما است.
- یک فوتون تابشی با انرژی بالا به یک الکترون آزاد از لایه خارجی برخورد کرده و از مدارش خارج می‌شود. فوتون بوسیله الکترون منحرف شده و در جهت جدیدی به عنوان اشعه اسکتر با انرژی کمتر حرکت می‌کند.
- فرمول کلاسیک برای محاسبه تغییر در طول موج یک فوتون اسکتر عبارت است از



Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

11

۳- پراکندگی کمپتون (پراکندگی غیر قابل انعطاف)



- با افزایش انرژی فوتون تابشی، فوتون‌های پراکنده شده و الکترون‌ها بیشتر به سمت عمق ماده یا بافت پیش می‌روند. به همین دلیل، این فوتون‌ها با احتمال بیشتری به آشکارسازهای اشعه ایکس در سیستم‌های تصویربرداری می‌رسند.



Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

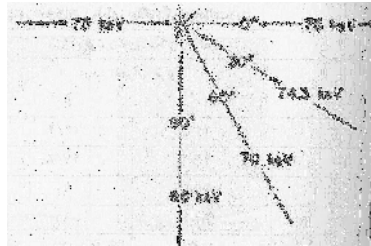
12

۳- پراکندگی کمپتون

- میزان انرژی کاهش یافته در اثر برخورد نیز بصورت زیر بدست می آید:

$$K\gamma = \frac{12.4}{\Delta\lambda(A^\circ)}$$

- اشعه‌های اسکتر بر روی فیلم باعث مه آلودگی یا نویز در تصاویر می‌شود. این مشکل وقتی که زاویه انحراف کمتر باشد، بیشتر خودش را نشان می‌دهد چونکه انرژی فوتون اسکتر زیاد است.

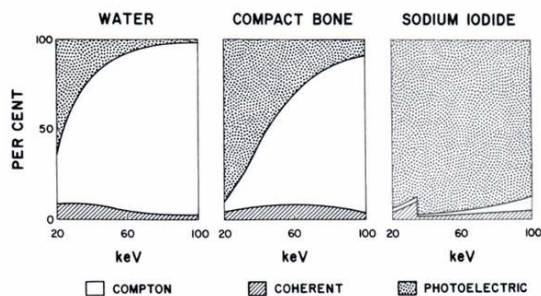


Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

13

تعداد نسبی وقوع برخوردهای اساسی

- درصد وقوع هر یک از برخوردهای اساسی در سه ماده آب، استخوان متراکم و یدور سدیم در محدوده انرژی ۲۰ تا ۱۰۰ کیلو الکترون ولت را نشان می‌دهد. بافت نرم، چربی، عضله و هوا از آنجا که همگی دارای عدد اتمی پایینی هستند رفتاری تقریباً مانند آنچه در نمودار مربوط به آب است مشاهده می‌شود.

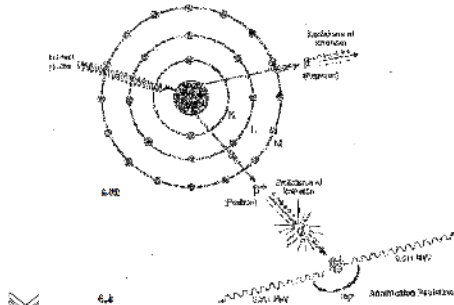


Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

14

۴- تولید جفت

- این نوع برخورد در رادیولوژی تشخیصی اتفاق نمی‌افتد.
- تولید جفت:** یک فوتون با انرژی زیاد تحت تأثیر نیروی هسته اتم، انرژی خود را به ماده تبدیل کرده و خود نیز ناپدید می‌شود. یکی از این دو ذره، الکترون معمولی و دیگری پوزیترون ذره‌ای با جرم مشابه الکترون شکل می‌گیرد.
- تولید جفت تنها زمانی رخ می‌دهد که انرژی اشعه ایکس و گاما به بیش از $\frac{1}{2}$ مگا الکترون ولت برسد.



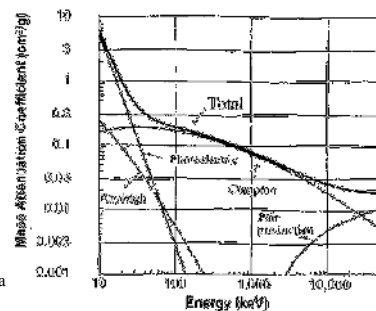
Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

15

تضعیف اشعه ایکس

- حذف فوتون‌ها از یک دسته پرتو اشعه ایکس در هنگام عبور از ماده که به علت جذب در ماده، پراکندگی اولیه و شکسته شدن فوتون‌ها ایجاد می‌شود را تضعیف می‌نامند.
- در فوتون‌های کم انرژی، اثر فتوالکتریک اثر غالب در فرآیندهای تضعیف در بافت نرم است.
- هنگامی که یک فوتون با انرژی بالا به یک ماده جاذب با عدد اتمی پایین (مثلاً بافت نرم) برخورد می‌کند، پراکندگی کمپتون غالب است.
- احتمال رخداد پراکندگی ریلی در تصویربرداری‌های پزشکی پایین است، به طوری که 0.1% از برخوردها در ماموگرافی و 5% از برخوردها را در رادیوگرافی قفسه سینه به خود اختصاص می‌دهد.

Mass Attenuation Coefficients for Soft Tissue



Depa

amic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

16

ضرایب تضعیف

- ضرایب تضعیف معیاری از کمیت اشعه تضعیف شده توسط ضخامت معین از ماده جاذب است. در رادیولوژی تشخیصی فقط دو ضریب کاهش خطی و جرمی مهم هستند.
- ضریب تضعیف خطی**
- این ضریب یک اندازه‌گیری کمی از تضعیف اشعه در هر سانتی متر از ماده جاذب است. بنابراین ضریب مزبور میزان تضعیف مورد انتظار در ضخامت معین از بافت را بیان می‌کند.
- این ضریب مختص تشعشعات تک انرژی بوده و به انرژی دسته اشعه و نوع ماده جاذب بستگی دارد.
- افزایش انرژی موجب کاهش تعداد پرتوهای اشعه X است که تضعیف می‌گردند و به تبع آن کاهش ضریب تضعیف خطی می‌شود. رابطه زیر بیانگر تضعیف اشعه X است:

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$
- N تعداد فوتون عبوری، N_0 تعداد فوتون اولیه، μ ضریب تضعیف خطی و X ضخامت ماده جاذب می‌باشد.



ضریب تضعیف خطی

- ضریب تضعیف خطی از مجموع تک‌تک ضرایب تضعیف خطی انواع برخوردها محاسبه می‌شود.

$$\mu = \mu_{\text{Rayleigh}} + \mu_{\text{Photoelectric}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\text{Pair}}$$

جدول (۳-۲): پارامترهای موثر بر ضریب تضعیف خطی در سه برخورد اصلی، فتوالکتریک، کمپتون و تولید جفت.

وابستگی به ضریب تضعیف خطی				نوع برخورد
چگالی فیزیکی (ρ)	چگالی الکترون (ρ_e)	عدد اتمی (Z)	انرژی فوتون (E)	
ρ	----	Z^3	$\frac{1}{E^3}$	فتوالکتریک
ρ	ρ_e	----	$\frac{1}{E^3}$	کمپتون
ρ	----	Z	$E (>1.02 \text{ MeV})$	تولید جفت



ضریب تضعیف جرمی

- این ضریب از طریق تقسیم ضریب تضعیف خطی بر دانسیته یا چگالی (ρ) بدست می‌آید و دارای علامت اختصاصی (μ/ρ) است که واحد آن برای ماده جاذب، گرم در سانتی متر مربع ($\frac{\text{اسی.}}{\text{cm}^2}$) است.

$$(\mu/\rho)[\text{cm}^2/\text{g}] = \frac{(\mu)[\text{cm}^{-1}]}{(\rho)[\text{g}/\text{cm}^3]}$$

- ضریب تضعیف آب، یخ و بخار آب یکسان است ولی ضریب تضعیف جرمی آنها خیلی متفاوت است به دلیل چگالی متفاوت آنها.



Department of Electrical Engineering, Najafanad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

19

لایه نیم جذب

- همانگونه که در موارد رادیواکتیو نیمه عمر داریم در تضعیف اشعه X نیز لایه (ضخامت) نیم جذب (Half-value layer) داریم.
- یعنی ضخامتی از ماده جاذب که شدت اشعه را نصف میزان اولیه کاهش می‌دهد. اگر مقادیر ناشی از تضعیف دسته اشعه X آزمایش فانتوم آب در معادله نمایی قرار داده شود. خواهیم داشت:

$$N = N_0 e^{-\mu x}$$

$$800 = 1000 \times e^{-\mu(1)} = \frac{1000}{e^{\mu}} \Rightarrow \mu = 0.22, HVL = \frac{0.693}{\mu} = \frac{0.693}{0.22} = 3.15 \text{ cm}$$



Department of Electrical Engineering, Najafanad Branch, Islamic Azad University, Dr. H. Pourghassem,

20