

جذب اشعه ایکس*

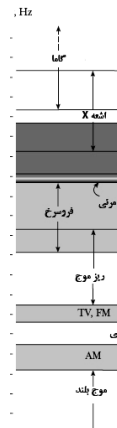
پارسا رنگریز

آزمایشگاه فیزیک ۴، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

۱ مقدمه

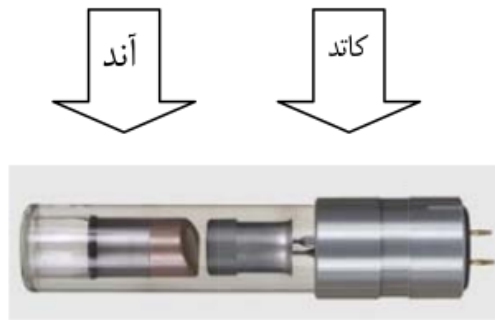
۱.۱ تولید اشعه ایکس

امروزه می‌دانیم که امواج الکترومغناطیسی نوسانات میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی هستند که آنها را بر اساس بازه‌های فرکانسی دسته‌بندی می‌کنیم. شکل ۱ این مطلب را نشان می‌دهد و در آن طول موج اشعه ایکس در حدود آنگستروم مشخص است. اشعه ایکس بعد از اشعه گاما پرنرژی‌ترین اشعه الکترومغناطیسی است که تا امروزه می‌شناسیم. لذا اشعه خطرناکی است و انسان نباید در معرض آن قرار گیرد. مهم‌ترین روش تولید اشعه ایکس، کند شدن الکترون‌های پرنرژی در اثر برهمکنش با ماده است. بر اساس دینامیک برخورد، انرژی کاسته شده از الکترون به صورت فوتون تابش می‌شود و طیف پیوسته اشعه ایکس را ایجاد می‌کند. روش دیگر تولید این اشعه، تولید فوتون در بازگشتن از حالت‌های برانگیخته پرنرژی به حالت‌های کم‌انرژی است. از آنجا که تفاوت انرژی‌های تراز الکترون‌ها در اطراف هسته گسسته است، طیف اشعه ایکس در این حالت گسسته خواهد بود. در شکل ۲ نمای یکی از ساده‌ترین لامپ‌های تولید اشعه ایکس که در این آزمایش استفاده شده است، نشان داده شده است.



شکل ۱: دسته‌بندی حوزه‌های امواج الکترومغناطیسی

* داده‌های این آزمایش از آقای آراد نصیری دریافت شده است



شکل ۲: شکلی از لامپ اشعه ایکس

۲.۱ آشکارسازی اشعه ایکس

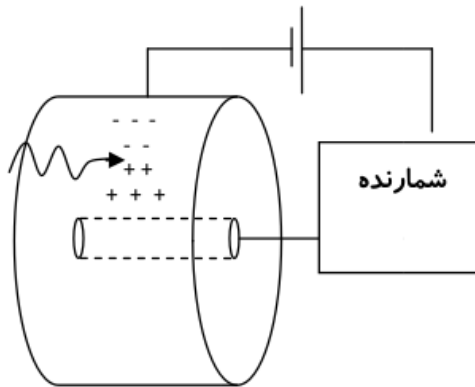
چشم ما نیز خود یک آشکارساز است؛ اما تنها بازه‌ای کوچک از امواج الکترومغناطیسی را به خوبی آشکار می‌کند که آن را به ناحیه مرئی می‌شناسیم (شکل ۱). برای آشکارسازی اشعه ایکس در این آزمایش از آشکارسازی به نام آشکارساز گایگر استفاده می‌کنیم. گایگر (سال ۱۹۲۵) یک شیمی‌دان آلمانی بود که برای اولین بار آشکارساز خود را برای آشکارسازی ذرات آلفا پیشنهاد کرد. از آنجا که این آشکارساز براحتی قابل ساخت و استفاده برای دیگر اشعه‌هاست، سریع جای خود را در آزمایشگاه و مراکز تحقیقاتی باز کرد. آشکارساز گایگر از دو استوانه هم‌محور تشکیل شده است و اختلاف پتانسیلی بین این دو استوانه برقرار است (شکل ۳). در حالت عادی به دلیل عایق بودن گاز داخل استوانه هیچ جریانی از مدار عبور نمی‌کند. قاعده استوانه با پرده بسیار نازکی از جنس میکا پوشانده شده که ارتباط گاز درون محیط استوانه را با بیرون قطع می‌کند. چنانچه یک فوتون یا ذره‌ای از میکا وارد استوانه شود و انرژی آن در حد انرژی یونیزاسیون گاز درون استوانه باشد، گاز یونیزه شده و بدین ترتیب در لحظه بسیار کوتاهی انبوهی از بارهای مثبت و منفی بوجود خواهد آمد. به دلیل اختلاف پتانسیل خارجی اعمال شده (یک اختلاف پتانسیل DC اعمال می‌کنیم) یک پالس جریان در مدار اتفاق می‌افتد که می‌توان با شمردن این پالس‌ها و یا اندازه‌گیری جریان عبوری از مدار، معیاری از تعداد فوتون‌هایی که به آشکارساز رسیده است، داشته باشیم. این شمارش توسط یک شمارنده انجام می‌گیرد. جریان عبوری به پتانسیل اعمال شده نیز بستگی دارد. هر چه این اختلاف پتانسیل بیشتر باشد، جریان عبوری بیشتر خواهد بود. اما در یک ناحیه خاص از ولتاژ این بستگی به حداقل خود می‌رسد و رابطه جریان بر حسب اختلاف پتانسیل خطی تقریباً راست می‌شود (شکل ۴) که این ناحیه مطلوب کار کردن آشکارساز است.

۳.۱ جذب اشعه ایکس

شدت امواج الکترومغناطیسی بصورت‌های مختلف می‌تواند کاهش یابد که از چهار حالت زیر خارج نیست:

- ۱) فوتوالکتریک (جذب کامل یک فوتون و انتقال انرژی آن به الکترون)
 - ۲) کامپتون (پراکندگی فوتون که منجر به کاهش انرژی فوتون خروجی می‌شود)
 - ۳) تامسون (پراکندگی الاستیک فوتون بدون کاهش انرژی فوتون خروجی)
 - ۴) تولید زوج (تبدیل حداقل دو فوتون به حداقل یک ذره و یک پاد ذره)
- باید توجه داشت که در پدیده تامسون انرژی فوتون اولیه و ثانویه تفاوت ندارد، اما جهت پرتوی اولیه و ثانویه متفاوت است؛ لذا در عمل فوتون ثانویه از باریکه اصلی جدا شده و شدت پرتو را کاهش می‌دهد. در حقیقت تامسون همان پدیده کامپتون است که برای هسته‌های سنگین اتفاق می‌افتاد. حال آنچه برای ما در این آزمایش مهم است، تاثیر مجموع این پدیده‌هاست که آن را به دو صورت زیر تقسیم می‌کنیم:

الف) وابستگی به ضخامت ماده: همانطور که بدیهی بنظر می‌رسد، توقع داریم که شدت عبوری از یک مانع عادی به ضخامت آن بستگی عکس داشته باشد. سوال این است که این بستگی چگونه است؟ آنچه تئوری الکترومغناطیسی پیش‌بینی می‌کند، رابطه



شکل ۳: شماتیکی از نحوه کار شمارنده و آشکارساز گایگر



شکل ۴: نمودار جریان عبوری از گایگر بر حسب ولتاژ و ناحیه مطلوب

نمایی است که ضریب نما به جنس ماده بستگی دارد.

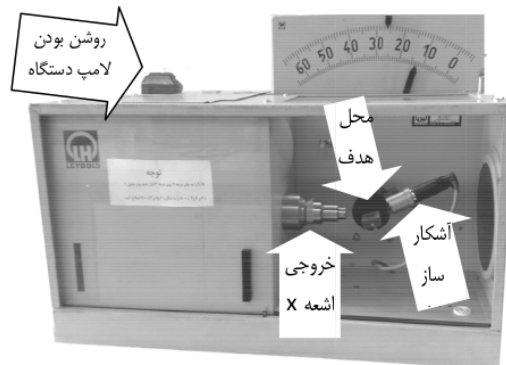
$$I = I_0 e^{-\kappa d} \quad (1)$$

که در آن I_0 شدت اولیه و κ ضریب جذب است.
 ب) وابستگی به نوع ماده: همانطور که در قسمت قبل نیز بیان شد، ضریب جذب به نوع ماده بستگی دارد. در حقیقت ضریب جذب تابعی از فرکانس و جنس ماده است ($\kappa = \kappa(\omega, n)$). البته این بستگی پیچیدگی‌های فراوانی دارد و در حوزه فیزیک ماده چگال مبحث مفصلی را به خود اختصاص می‌دهد؛ اما با در نظر گرفتن کلیات می‌توان رابطه نسبی را برای بستگی κ به عدد اتمی مانع بدست آورد. می‌توان پرسید با افزایش n عدد اتمی مانع، شدت عبوری از مانع می‌شود یا زیاد؟ در این آزمایش پاسخ خواهیم داد.

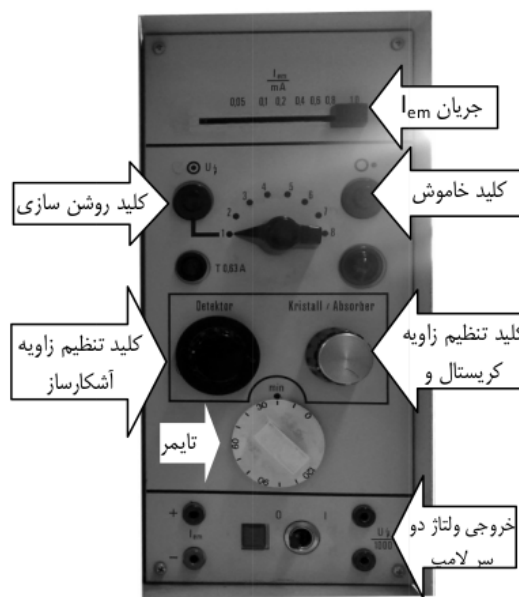
۲ وسایل آزمایش

- (۱) محفظه تولید اشعه و آشکارساز گایگر (شکل ۵ و ۶)
- (۲) دستگاه تنظیم ولتاژ و تقویت گایگر (شکل ۷)
- (۳) شمارنده (شکل ۵)
- (۴) ورقه زیرکونیوم

۵) دو نوع جذب کننده پرتوی ایکس که یکی با ضخامت‌های مختلف آلومینیوم است و دیگری از عناصر مختلف.



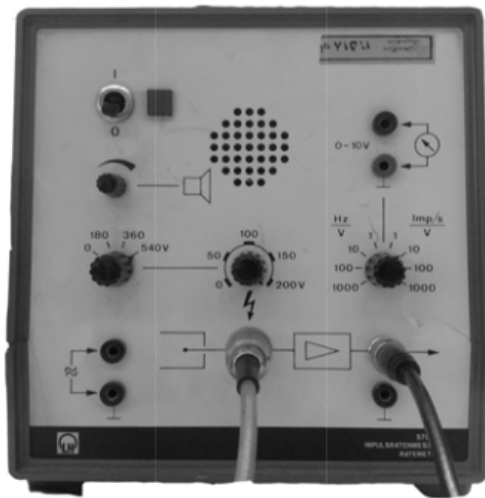
شکل ۵: محفظه تولید اشعه و چشم گایگر



شکل ۶: پنل تنظیمات محفظه تولید اشعه و چشم گایگر

۳ شرح آزمایش

بعد از اتصال دستگاه به برق و در حالت در بسته I_{em} و U_A را کمینه می‌کنیم و دکمه روشن را می‌زنیم و سپس ولتاژ U_A و جریان I_{em} را به مقدار دلخواه تنظیم کنید. تایمر دستگاه را روی ۱۲۰ دقیقه می‌گذاریم و در صورت نیاز آن را تمدید می‌کنیم. فراموش



شکل ۷: دستگاه تنظیم ولتاژ و تقویت گایگر

نمی‌کنیم که ولتاژ واقعی که روی دستگاه با اعداد ۱ تا ۷ می‌بینیم را با ولت‌متر تعیین کنیم. ولتاژی که اندازه‌گیری می‌شود از ولتاژ واقعی بسیار کوچکتر است. پس برای تصحیح باید آن را در $\sqrt{2} \times 1000$ ضرب کنیم.

۱.۳ آزمایش یک

همانطور که در مقدمه توضیح داده شد، گایگر در یک محدوده پتانسیلی مطلوب کار می‌کند و فقط در این ناحیه جریان تقریباً به پتانسیل اعمالی بستگی ندارد. برای آزمایش دستگاه تولید اشعه ایکس و آشکارساز گایگر را طبق دستور عمل توضیح داده شده روشن می‌کنیم. فیلتر زیرکونیوم را جلوی منبع اشعه ایکس قرار داده (شکل ۸) و U_A را روی ۳ و I_{em} را روی $1mA$ تنظیم می‌نماییم. آشکارساز و شمارنده گایگر را نیز روشن می‌کنیم و ولتاژ آشکارساز گایگر را از کمینه تا بیشینه زیاد کرده و جریان رسیده به آشکارساز را اندازه می‌گیریم.

همانگونه که قابل حدس است، نقش زیرکونیوم ($Z = 40$) فیلتر کردن اشعه ایکس است. بطوری که از مشخصه فرکانسی برخوردار است که امواج با طول موج حدود $0.71A^\circ$ را به خوبی عبور می‌دهد. این موضوع در آزمایش کامپتون کامل‌تر توضیح داده‌ایم.

ولتاژ گایگر حاصل از جمع دو ولتاژ روی دستگاه یکی از صفر تا 540 ولت و دیگری از صفر تا 200 ولت است.

۲.۳ آزمایش دو

آشکارساز را در زاویه صفر درجه می‌گذاریم و مانع آلومینیومی با ضخامت‌های متفاوت را روی قسمت هدف می‌بندیم (شکل ۹). فیلتر زیرکونیوم را نیز جلوی آشکارساز می‌گذاریم. ولتاژ U_A را بر روی ۷ تنظیم کرده و شدت رسیده به آشکارساز را برای ضخامت‌های مختلف اندازه‌گیری می‌کنیم و آن را در جدول ۱ ثبت می‌کنیم. باید توجه داشت که آشکارساز و مانع آلومینیومی هم‌راستا باشند چرا که اگر کمی هدف از نقطه مطلوب جابجا شود، باعث عدم دقت در ضخامت ماده و بدست آمدن نتایج غیردقیق می‌شود.



شکل ۸: ورقه زیرکونیوم در مسیر پرتوی اشعه ایکس



شکل ۹: ضخامت‌های مختلف آلومینیوم در مسیر پرتو اشعه ایکس و در مقابل آشکارساز گایگر

۳.۳ آزمایش سه

آشکارساز را در زاویه صفر می‌گذاریم و مانع با مواد متفاوت را روی قسمت هدف می‌بندیم و فیلتر زیرکونیوم را نیز جلوی آشکارساز می‌گذاریم. ولتاژ U_A را بر روی ۷ تنظیم کرده و شدت رسیده به آشکارساز را برای مواد مختلف اندازه‌گیری می‌نماییم. نتایج را در جدول ۲ ثبت می‌کنیم.

۴ هدف آزمایش

آشنایی با روش تولید اشعه ایکس، آشکارسازی اشعه ایکس و بررسی وابستگی شدت عبوری اشعه ایکس به ضخامت مانع و نیز عدد اتمی مانع

۵ جدول داده‌ها

جدول ۱: شدت دریافتی پس از عبور از اشعه ایکس از ضخامت‌های مختلف آلومینیوم

Thickness(mm)	0.5	1	1.5	2	2.5	3
$I_1(s^{-1})$	3102	2530	1889	1519	1163	925
$I_2(s^{-1})$	3118	2515	1939	1510	1149	934
$I_3(s^{-1})$	3133	2485	1917	1526	1154	932
$I(s^{-1})$	3118	2510	1915	1518	1155	930
I/I_0	0.8653	0.6966	0.5315	0.4213	0.3206	0.2581
$\Delta(I/I_0)$	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003

$$I_0 = 3603s^{-1}, V = 25.6V$$

جدول ۲: شدت دریافتی پس از عبور اشعه ایکس از فلزات مختلف

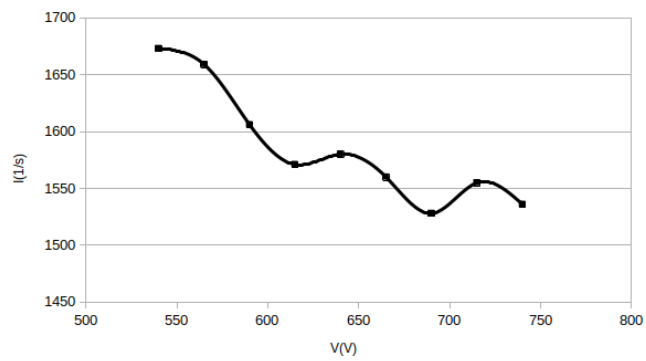
Z	6	13	26	29	40	47
$I_1(s^{-1})$	3596	3172	134	33	100	8.2
$I_2(s^{-1})$	3602	3167	131	39	97	8.6
$I_3(s^{-1})$	3607	3174	131	41	102	7.8
$I(s^{-1})$	3602	3171	132	38	100	8.2

$$I_0 = 3631s^{-1}, V = 25.5V$$

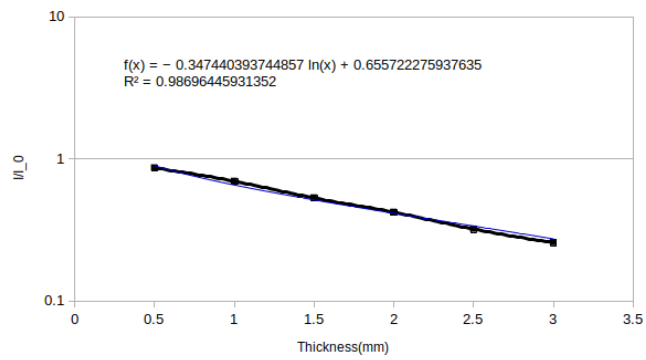
جدول ۳: شدت دریافتی بر حسب ولتاژ گایگر

V(V)	540	565	590	615	640	665	690	715	740
$I_1(s^{-1})$	1685	1642	1582	1560	1602	1562	1545	1547	1501
$I_2(s^{-1})$	1671	1674	1619	1603	1564	1552	1505	1565	1540
$I_3(s^{-1})$	1663	1660	1609	1551	1574	1566	1533	1554	1568
$I(s^{-1})$	1673	1659	1606	1571	1580	1560	1528	1555	1536

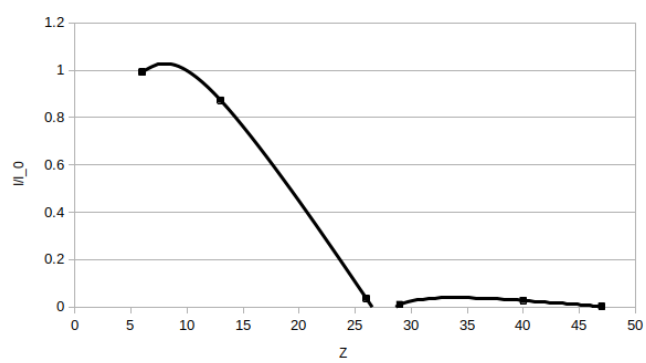
۶ نمودار داده‌ها



شکل ۱۰: نمودار شدت بر حسب ولتاژ گایگر



شکل ۱۱: نمودار نسبت شدت بر حسب ضخامت (نیم لگ)



شکل ۱۲: نمودار شدت بر حسب عدد اتمی

۷ خطا

خطاهای این آزمایش بدین شرح است (این آزمایش بسیار پرخطاست):

- (۱) خطای سیستماتیک دستگاه‌ها
 - (۲) خطای پالس زمینه
 - (۳) محدود بودن فیت کردن بهترین نمودار
 - (۴) کوچک بودن دامنه اندازه‌گیری
- خطای شیب نمودار خطی فیت شده نیز این‌گونه بدست می‌آید:

$$\Delta b = b \sqrt{\frac{1}{N-2} \left(\frac{1}{r^2} - 1 \right)} \quad (2)$$

که N تعداد داده‌ها و r رگرسیون است.

۸ نتیجه‌گیری

(۱) ؟

- (۲) با افزایش ضخامت ورقه آلومینومی شدت اشعه ایکس کاهش می‌یابد (مطابق معادله ۱)
- (۳) شدت دریافتی پس از عبور از اشعه ایکس از فلزات مختلف در جدول ۲ روندی منطقی دارد چرا که با افزایش عدد اتمی، عبور دشوارتر می‌شود و در نتیجه شدت کم می‌شود.
- (۴) با استفاده از شیب نمودار نسبت شدت بر حسب ضخامت، داریم:

$$\kappa = 350 \pm 20(m^{-1}) \quad (3)$$

همانگونه که انتظار داشتیم چون رابطه تئوریک نمایی است، در صفحه نیم‌لگ باید یک خط ظاهر می‌شد که با توجه به نمودار بالا این اتفاق رخ داده است.

(۵) در بخش‌های قبلی گفته شد که با افزایش عدد اتمی می‌دانیم شدت کاهش می‌یابد چرا که قابلیت عبور از بین می‌رود. در نهایت کمی این نمودار شیب مثبت پیدا کرده که قطعاً ناشی از خطاهای آزمایش است.

(۶) اشعه ایکس عموماً با تاباندن الکترون‌های پراثری (تحت تاثیر ولتاژ بالا) به یک آند و کند شدن آنها در آند و در نتیجه ایجاد تابش در آنها تولید می‌شود یعنی می‌توان با پرتوی کاتدی و دادن ولتاژ مناسب الکترون‌ها را آنقدری پراثری کرد که فوتون‌های تابشی آنها در ناحیه اشعه ایکس قرار گیرند.

پرتوی کاتدی کاربردهای گوناگونی دارد که مهم‌ترین آنها عکس‌برداری رادیولوژی است که در آن بدلیل عدد اتمی بالا کلسیم در استخوان‌ها شدت پرتوی عبوری از آنها کمتر است و تصویری از آنها روی آشکارساز ایجاد می‌شود. از سایر کاربردهای اشعه ایکس می‌توان به کریستالوگرافی اشاره کرد. همچنین از تابش ایکس در رصدخانه‌های کیهانی استفاده می‌شود مانند تلسکوپ.

(۷) از جذب اشعه ایکس می‌توان در صورت دانستن ثابت جذب، ضخامت مانع را یافت و یا با اندازه‌گیری شدت با ضخامت‌های گوناگون ثابت جذب را محاسبه کرد. همچنین با بررسی روابط پیچیده ثابت جذب و یافتن رابطه آن با فرکانس و جنس می‌توان فرمانس پرتو را نیز اندازه گرفت و عدد اتمی ماده را بدست آورد. البته تفاوت جذب پرتوی ایکس در ضخامت و جنس می‌تواند کاربردهای دیگری داشته باشد، مثلاً رادیولوژی.

(۸) تاثیر طول موج در جذب پرتوی ایکس در حقیقت در ثابت جذب تعریف می‌شود که تابعی از جنس ماده و فرکانس فرودی است. تعاریف گوناگونی برای جذب ارائه می‌شود که ما یک تعریف بر اساس شار فرودی را بیان می‌کنیم:

$$\kappa_{\lambda} = - \frac{1}{\Phi_{e,\lambda}} \frac{d\Phi_{e,\lambda}}{dz} \quad (4)$$

که در آن $\Phi_{e,\lambda}$ شار فرودی در طول موج است که تعریف آن به صورت زیر است:

$$\Phi_{e,\lambda} = \frac{\partial \Phi_e}{\partial \lambda} \quad (5)$$

که خود Φ_e نیز اینگونه تعریف می‌شود:

$$\Phi_e = \frac{\partial Q_e}{\partial t} \quad (6)$$

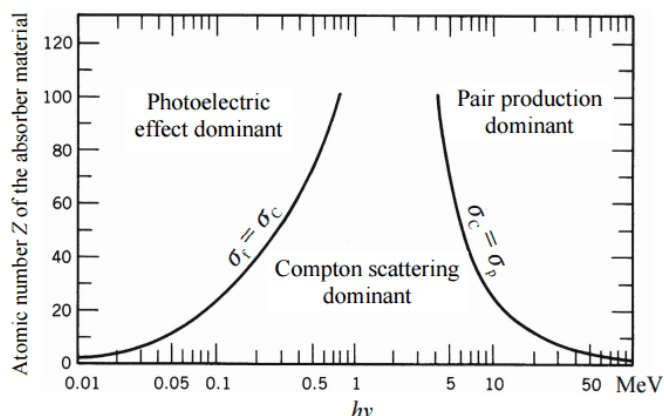
که Q_e انرژی عبوری است و چون با طول موج رابطه عکس دارد، مشخص است که با افزایش طول موج، جذب اشعه ایکس کاهش می‌یابد.

(۹) پالس زمینه می‌تواند ناشی از نورهای اطراف و سایر پرتوهای الکترومغناطیسی باشد.
 (۱۰) فوتون‌ها از طریق چهار فرایند متفاوت می‌توانند با اتم‌های یک ورقه برهم‌کنش داشته باشند، فوتوالکتریک، تولید زوج تامسون، کامپتون. دو فرایند اول فوتون‌ها را کاملاً جذب می‌کنند، در حالی که دو فرایند آخر تنها آنها را پراکنده می‌کنند. البته تمام فرایندها فوتون‌ها را از باریکه موازی دور می‌سازند. اینکه تحت مجموعه‌ای از شرایط مفروض شانس وقوع کدام فرایند بیشتر است، از اهمیت نظری و عملی قابل توجهی برخوردار است. این شانس یا احتمال وقوع با چهار سطح مقطع بیان می‌شود.
 الف) پراکندگی: مساحت فرضی که احتمال پراکنده شدن پرتو به وسیله ذرات در مرکز پراکندگی را شرح می‌دهد.

$$\sigma_{total} = \oint d\Omega \frac{d\sigma}{d\Omega} \quad (7)$$

فوتوالکتریک: ناشی از جدا شدن الکترون از اتم یک فلز که با انرژی فوتون ورودی، گسیل می‌شود.
 تولید زوج: جذب انرژی توسط هسته و تولید زوج الکترون و پوزیترون

ب) مطابق شکل زیر، همانگونه که مشخص است، در بازه‌های انرژی مشخص تاثیر سطح مقطع تغییر می‌کند. یعنی در انرژی‌های کم فوتوالکتریک غالب است و در میانه کامپتون و در انرژی‌های بالا تولید زوج مسیر است.



شکل ۱۳: نمودار سطوح مقطع بر حسب انرژی فوتون