



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش هسته‌ای

شبیه سازی آشکارساز HPGe و تعیین لایه مرده و ناحیه فعال آن با استفاده از کد

MCNP

استادان راهنما:

دکتر محمدرضا عبدی

دکتر مجتبی مستجاب الدعواتی

استاد مشاور:

مهندس ایرج جباری

پژوهشگر:

آرش ابراهیمی

مهر ماه ۱۳۸۹

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات
و نوآوری‌های ناشی از موضوع این پایان‌نامه
متعلق به دانشگاه اصفهان است.



دانشگاه اصفهان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی فیزیک گرایش هسته‌ای آقای
آرش ابراهیمی تحت عنوان

**شبیه‌سازی آشکارساز HPGe و تعیین لایه مرده و ناحیه فعال آن با استفاده از کد
MCNP**

در تاریخ ۸۹/۷/۲۸ توسط هیات داوران زیر بررسی و با درجه عالی به تصویب نهایی رسید.

- | | | | |
|-------------------------------|----------------------------|--------------------------|------|
| ۱- استادان راهنمای پایان نامه | دکتر محمدرضا عبدی | با مرتبه‌ی علمی استادیار | امضا |
| | دکتر مجتبی مستجاب الدعواتی | با مرتبه‌ی علمی استادیار | امضا |
| ۲- استاد مشاور پایان نامه | مهندس ایرج جبّاری | با مرتبه‌ی علمی مربی | امضا |
| ۳- استاد داور داخل گروه | دکتر مرتضی حاجی محمود زاده | با مرتبه‌ی علمی استادیار | امضا |
| ۴- استاد داور خارج از گروه | دکتر خدیجه رضایی | با مرتبه‌ی علمی استادیار | امضا |

امضای مدیر گروه

بر خود لازم می‌دانم از استاد گرامی جناب آقای دکتر عبدی به خاطر راهنمایی‌ها و نظرات راهگشا و سازنده‌ی ایشان تقدیر و تشکر کنم. همچنین مراتب تشکر خود را از استاد گرامی جناب آقای دکتر مستجاب‌الدعواتی اعلام می‌دارم. از مدعوین محترم جلسه‌ی دفاع، جناب آقای دکتر حاجی محمودزاده و سرکار خانم دکتر رضایی که زحمت مطالعه‌ی متن پایان‌نامه را نیز به خود دادند مراتب سپاسگزاری خود را اعلام می‌دارم. از آقایان مهندس جباری و مهندس زارع که به ترتیب در زمینه‌ی یادگیری کد و طیف‌نگاری تجربی به بنده لطف بسیار نمودند کمال تشکر و سپاسگزاری را دارم. از پرسنل محترم آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان خانم‌ها کبری، نصیری و هوشمند که از هیچ‌کلی دریغ نکردند ممنونم. از تمام هم‌دوره‌ای‌ها و دوستانم از جمله خانم‌ها مهنجی، جباریان و توکل و آقایان شایان، ربیسی و عرفانیان که در این مدت روزهای خوبی را با آنان سپری کردم کمال تشکر را دارم و برای آن‌ها آرزوی سلامتی و موفقیت دارم.

تقدیم بہ:

مادر،

پدر،

و ہمسر مہربانم

چکیده:

در این پژوهش، شبیه‌سازی‌های مونت کارلو برای به دست آوردن بازدهی قله‌ی تمام-انرژی آشکارساز HPGe با استفاده از نرم افزار MCNP انجام شد. پس از مشاهده‌ی اختلاف بین مقادیر محاسباتی مونت کارلو و داده‌های تجربی، سعی شد با تغییر دادن ضخامت بلور به میزان خیلی کم (در حدود چندین صدم میلی‌متر) و برازش منحنی شبیه‌سازی شده با منحنی تجربی، ضخامت حقیقی بلور، بدون در نظر گرفتن لایه مرده به دست آید. تفاوت روش به کار رفته در این پژوهش با کارهای مشابه قبل از آن، در چیدمان چشمه‌های پرتوزا است که هنگام طیف‌گیری خیلی نزدیک به پنجره‌ی آشکارساز و حتی روی بدنه‌ی آلومینیومی آن قرار داده شده‌اند. این کار برای حذف عامل تضعیف‌کننده‌ی هوا صورت گرفته است.

کلید واژه‌ها: آشکارساز HPGe، لایه مرده، کد مونت کارلوی MCNP، منحنی بازدهی.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: برهم کنش فوتون با ماده و مقدمه‌ای بر طیف‌نگاری

۱-۱- انواع تابش	۱
۲-۱- برهم‌کنش‌های پرتوهای گاما و ایکس با ماده	۱
۱-۲-۱- اثر فوتوالکتریک	۲
۲-۲-۱- پراکندگی کامپتون	۲
۳-۲-۱- تولید زوج	۳
۴-۲-۱- ضریب تضعیف	۴
۵-۲-۱- ضریب جذب انرژی فوتون	۶
۶-۲-۱- ضریب‌های انباشت	۶
۳-۱- طیف‌نگاری	۷
۱-۳-۱- اندازه‌گیری طیف دیفرانسیلی با تحلیل‌گر تک‌کاناله	۸
۲-۳-۱- رابطه‌ی بین توزیع ارتفاع تپ و طیف انرژی	۸
۳-۳-۱- قدرت تفکیک انرژی	۱۰
۴-۳-۱- بازدهی آشکارساز	۱۰
۴-۱- طیف‌نگاری پرتوهای گاما	۱۲
۱-۴-۱- طیف حاصل از فوتون‌های با انرژی کم‌تر از $1,022 \text{ MeV}$	۱۲
۲-۴-۱- طیف حاصل از فوتون‌های با انرژی بیش‌تر از $1,022 \text{ MeV}$	۱۶

فصل دوم: آشکارساز HPGe و ساختمان آن

۱-۲- مقدمه	۱۸
۲-۲- رده‌بندی الکتریکی جامدها و گاف انرژی	۱۸
۳-۲- الکترون و حفره	۱۹
۴-۲- نیمه‌رساناهای ذاتی و غیرذاتی و نقش ناخالصی‌ها	۱۹
۵-۲- نیمه‌رسانای نوع n و نیمه‌رسانای نوع p	۲۰
۶-۲- پیوند p-n به عنوان یک آشکارساز	۲۱
۷-۲- تعاریف و روابط مهم	۲۳

عنوان	صفحه
۸-۲- خواص پیوند بایاس معکوس	۲۷
۹-۲- پیکربندی‌های آشکارساز نیمه‌رسانا	۲۷
۱۰-۲- آشکارسازهای کلاً تهی شده	۲۷
۱۱-۲- ساخت آشکارسازهای ژرمانیومی فوق خالص (HPGe)	۳۰
۱۲-۲- پیکربندی مسطح	۳۱
۱۳-۲- پیکربندی هم‌محور	۳۳
۱۴-۲- میدان الکتریکی و ظرفیت	۳۵
۱-۱۴-۲- هندسه‌ی مسطح	۳۵
۲-۱۴-۲- هندسه‌ی هم‌محور	۳۷
۱۵-۲- لایه مرده‌ی سطحی	۴۰
۱۶-۲- تعیین ضخامت لایه مرده	۴۰
۱-۱۶-۲- روش تجربی	۴۱
۲-۱۶-۲- روش تجربی-شبه‌سازی	۴۲

فصل سوم: آشنایی با کد هسته‌ای MCNP

۱-۳- مقدمه	۴۴
۲-۳- کد محاسباتی MCNP	۴۵
۳-۳- کار با کد MCNP	۴۶
۴-۳- انواع فایل ورودی	۴۸
۱-۴-۳- اجرای اولیه	۴۸
۲-۴-۳- اجرای پیوسته	۴۸
۵-۳- سلول	۴۸
۶-۳- تعریف هندسه	۴۹
۱-۶-۳- سلول‌های تعریف شده به وسیله‌ی اشتراک مناطق فضا	۵۰
۲-۶-۳- سلول‌های تعریف شده به وسیله‌ی اجتماع مناطق فضا	۵۰
۳-۶-۳- عملگر تکمیل‌کننده	۵۱
۷-۳- تعریف سطوح	۵۱
۸-۳- تعریف اطلاعات	۵۳

عنوان	صفحه
۱-۸-۳- دستور تعریف نوع مساله	۵۳
۲-۸-۳- معرفی اهمیت نواحی	۵۳
۳-۸-۳- دستور تعریف مواد	۵۴
۴-۸-۳- تعریف چشمه	۵۴
۵-۸-۳- معرفی خروجی‌های کد MCNP	۵۶
۶-۸-۳- تقسیم‌بندی انرژی خروجی تالی	۵۶
۷-۸-۳- پایان‌دهنده‌های مساله	۵۷
۸-۸-۳- روش‌های کاهش واریانس	۵۷

فصل چهارم: آزمایش‌ها و نتایج

۱-۴- مقدمه	۵۹
۲-۴- روش شبیه‌سازی	۶۰
۱-۲-۴- برنامه‌ی شبیه‌سازی آشکارساز HPGe	۶۱
۲-۲-۴- اجرای برنامه‌ی شبیه‌سازی آشکارساز HPGe	۶۱
۳-۴- روش تجربی	۶۲
۱-۳-۴- معرفی آشکارساز	۶۳
۲-۳-۴- معرفی چشمه‌ها	۶۳
۳-۳-۴- نمونه طیف‌های نگاشته شده	۶۴
۴-۴- محاسبه‌ی لایه مرده آشکارساز HPGe	۶۶
۱-۴-۴- منحنی‌ها و داده‌های مربوط	۶۷
۲-۴-۴- نکات تکمیلی	۹۰
۵-۴- نتایج کلی	۹۱
۶-۴- محاسبه‌ی انرژی ذخیره شده در لایه مرده و ناحیه فعال	۹۱
پیوست	۹۵
منابع و مأخذ	۹۶

فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: اهمیت نسبی سه برهم‌کنش عمده‌ی گاما	۵
شکل ۱-۲: شدت باریکه‌ی تراگسیلنده که به صورت نمایی با ضخامت ماده کاهش پیدا می‌کند	۵
شکل ۱-۳: چشمه‌ی همسانگرد نقطه‌ای که در پشت سپری به ضخامت t قرار دارد	۷
شکل ۱-۴: طیف انرژی دیفرانسیلی	۸
شکل ۱-۵: طیف انرژی یک چشمه‌ی تک انرژی گاما و توزیع ارتفاع حاصل از یک آشکارساز	۹
شکل ۱-۶: نمایش قدرت تفکیک انرژی آشکارساز که با Γ یا نسبت Γ/E_0 بیان می‌شود	۱۰
شکل ۱-۷: یک چشمه‌ی همسانگرد نقطه‌ای در فاصله‌ی d از یک آشکارساز استوانه‌ای	۱۲
شکل ۱-۸: برهم‌کنش فوتوالکتریک: تمام یا بخشی از انرژی الکترون در آشکارساز ذخیره می‌شود	۱۳
شکل ۱-۹: طیف گامای تک‌انرژی (طیف چشمه)	۱۴
شکل ۱-۱۰: طیف ارتفاع تپ حاصل از طیف چشمه‌ی شکل قبل در غیاب افت‌وخیزهای آماری	۱۴
شکل ۱-۱۱: طیف ارتفاع تپ اندازه‌گرفته‌شده‌ی حاصل از طیف چشمه‌ی شکل قبل	۱۵
شکل ۱-۱۲: طیف گامایی که قله‌های تک‌فراری و دو-فراری را نشان می‌دهد	۱۷
شکل ۲-۱: ساختار نواری برای انرژی الکترونی در عایق‌ها و نیمه‌رساناها	۱۹
شکل ۲-۲: نمایش یک ناخالصی بخشنده و تناظر سطوح بخشنده تولیدشده در گاف نواری سیلیسیوم	۲۰
شکل ۲-۳: نمایش یک ناخالصی پذیرنده و تناظر سطوح پذیرنده در گاف نواری سیلیسیوم	۲۱
شکل ۲-۴: یک پیوند $p-n$ با پیش‌ولت وارون که به عنوان یک آشکارساز عمل می‌کند	۲۲
شکل ۲-۵: تراکم اتم‌های بخشنده و پذیرنده و کمیت‌های الکتریکی در یک پیوند $p-n$	۲۳
شکل ۲-۶: نمودار میدان الکتریکی در یک آشکارساز بایاس معکوس	۲۹
شکل ۲-۷: نمودارهای میدان الکتریکی برای انواع مختلف آشکارسازهای نیمه‌رسانای مسطح کلاً تهی شده	۲۹
شکل ۲-۸: تغییرات رسانندگی الکتریکی در ژرمانیوم بر حسب تابعی از تراکم ناخالصی	۳۰
شکل ۲-۹: پیکربندی یک آشکارساز HPGe مسطح	۳۲
شکل ۲-۱۰: انواع مختلف آشکارساز هم محور	۳۴
شکل ۲-۱۱: تغییرات شدت میدان الکتریکی، داخل حجم فعال یک آشکارساز مسطح HPGe	۳۷
شکل ۲-۱۲: تغییرات شدت میدان الکتریکی بر حسب شعاع یک آشکارساز هم محور HPGe	۳۹
شکل ۲-۱۳: منحنی‌های بازدهی تجربی و شبیه‌سازی شده با در نظر گرفتن مقادیر متفاوت لایه‌ی مرده	۴۲
شکل ۲-۱۴: برازش بهترین منحنی بازدهی شبیه‌سازی شده با منحنی بازدهی تجربی	۴۳
شکل ۳-۱: چگونگی تعریف سلول‌های اشتراکی و اجتماعی در کد MCNP	۵۰

عنوان

صفحه

- شکل ۴-۱: نمایش تصویر بلور ژرمانیوم داخل آشکارساز HPGe که با استفاده از اشعه‌ی ایکس تهیه شده است ۶۰
- شکل ۴-۲: نمونه‌ای از طیف تولید شده توسط کد کامپیوتری MCNP ۶۱
- شکل ۴-۳: نمونه‌ای از طیف ثبت شده از چشمه‌ی کبالت که توسط نرم افزار DAS ثبت شده است ۶۷
- شکل ۴-۴: طیف کالیبره شده‌ی مرحله‌ی قبل با استفاده از نرم افزار Maestro ۶۵
- شکل ۴-۵: محل قرارگیری چشمه‌ها در جلو و روی بدنه‌ی آشکارساز ۶۷
- شکل ۴-۶: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی C ۶۸
- شکل ۴-۷: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱ ۷۰
- شکل ۴-۸: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۳ ۷۲
- شکل ۴-۹: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۵ ۷۳
- شکل ۴-۱۰: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۷ ۷۴
- شکل ۴-۱۱: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۲ ۷۶
- شکل ۴-۱۲: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۴ ۷۷
- شکل ۴-۱۳: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۶ ۷۸
- شکل ۴-۱۴: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۸ ۷۹
- شکل ۴-۱۵: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۹ ۸۱
- شکل ۴-۱۶: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱۰ ۸۲
- شکل ۴-۱۷: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱۱ ۸۳
- شکل ۴-۱۸: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱۵ ۸۴
- شکل ۴-۱۹: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱۲ ۸۶
- شکل ۴-۲۰: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱۳ ۸۷
- شکل ۴-۲۱: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱۴ ۸۸
- شکل ۴-۲۲: نمودارهای بازدهی مربوط به نقطه‌ی ۱۶ ۸۹
- شکل ۴-۲۳: نمودارهای اتلاف انرژی در نقطه‌ی C ۹۲
- شکل ۴-۲۴: نمودارهای اتلاف انرژی در نقاط ۱, ۳, ۵, ۷ ۹۲
- شکل ۴-۲۵: نمودارهای اتلاف انرژی در نقاط ۲, ۴, ۶, ۸ ۹۳
- شکل ۴-۲۶: نمودارهای اتلاف انرژی در نقاط ۹, ۱۰, ۱۱, ۱۵ ۹۳
- شکل ۴-۲۷: نمودارهای اتلاف انرژی در نقاط ۱۲, ۱۳, ۱۴, ۱۶ ۹۴

فهرست جدول‌ها

عنوان	صفحه
جدول ۱-۳: انواع صفحات، دستورها و ترتیب ورودی‌ها در MCNP	۵۲
جدول ۱-۴: مشخصات آشکارساز GMX-۱۰۱۸۰	۶۳
جدول ۲-۴: مشخصات چشمه‌های به کار رفته در روش تجربی	۶۳
جدول ۳-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی C	۶۸
جدول ۴-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱	۷۰
جدول ۵-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۳	۷۲
جدول ۶-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۵	۷۳
جدول ۷-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۷	۷۴
جدول ۸-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۲	۷۶
جدول ۹-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۴	۷۷
جدول ۱۰-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۶	۷۸
جدول ۱۱-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۸	۷۹
جدول ۱۲-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۹	۸۱
جدول ۱۳-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱۰	۸۲
جدول ۱۴-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱۱	۸۳
جدول ۱۵-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱۵	۸۴
جدول ۱۶-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱۲	۸۶
جدول ۱۷-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱۳	۸۷
جدول ۱۸-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱۴	۸۸
جدول ۱۹-۴: داده‌های مربوط به نقطه‌ی ۱۶	۸۹
جدول ۲۰-۴: خلاصه‌ی اندازه‌گیری‌های لایه مرده در نقاط مختلف	۹۱

فصل اول

برهم کنش فوتون با ماده و مقدمه‌ای بر طیف‌نگاری

۱-۱ انواع تابش

آشکارسازی تابش بر پایه‌ی برهم کنش‌های آن و انرژی ذخیره شده در ماده‌ای است که آشکارساز از آن ساخته شده است. بنابراین برای آن که بتوانیم آشکارسازها را بسازیم و نتایج اندازه‌گیری را تعبیر و تفسیر کنیم، نیاز به این داریم که بدانیم تابش چگونه برهم کنش می‌کند و پیامد برهم کنش‌های مختلف چیست. برای بحثی که به دنبال می‌آید، تابش یوننده را به سه دسته تقسیم می‌کنیم:

۱. ذرات باردار: الکترون، پوزیترون، پروتون، دوترون، آلفا و یون‌های سنگین ($A > 4$).

۲. فوتون‌ها: پرتوهای گاما یا ایکس

۳. نوترون

که در این جا بنا بر لزوم فقط به بررسی برهم کنش فوتون‌ها با ماده پرداخته می‌شود.

۲-۱ برهم کنش‌های پرتوهای گاما و ایکس با ماده

پرتوهای گاما و ایکس تابش‌های الکترومغناطیس هستند. اگر آن‌ها را به صورت ذره در نظر بگیریم، وقتی با سرعت نور c حرکت می‌کنند، جرم سکون و بار آن‌ها صفر است. نام مشترک برای پرتوهای ایکس و گاما، وقتی به صورت ذره در نظر گرفته شوند، فوتون است. در این متن، فوتون‌های با انرژی کم‌تر از 1MeV را پرتو ایکس و بالاتر از آن را پرتو گاما می‌نامیم. تولید پرتوهای ایکس، عموماً در اثر گذارهای اتمی مثل برانگیزش و یونش

صورت می‌گیرد. پرتوهای گاما در گذارهای هسته‌ای گسیل می‌شوند. در ادامه به سه نوع از برهم‌کنش‌های فوتون می‌پردازیم.

۱-۲-۱ اثر فوتوالکتریک

اثر فوتوالکتریک، برهم‌کنشی است بین یک فوتون و یک الکترون اتمی مقید. در اثر این برهم‌کنش، فوتون ناپدید می‌شود و یکی از الکترون‌های اتمی به صورت یک الکترون آزاد به نام فوتوالکتریک به بیرون رانده خواهد شد. انرژی جنبشی این الکترون برابر است با [۱]:

$$T = E_\gamma - B \quad (1-1)$$

که در آن E_γ ، انرژی فوتون و B ، انرژی بستگی الکترون است. احتمال رخداد این برهم‌کنش، سطح مقطع فوتوالکتریک یا ضریب فوتوالکتریک نام دارد. اگر احتمال رخداد اثر فوتوالکتریک بر واحد راهی که فوتون پیموده را با τ نشان دهیم، از منابع مختلف داریم [۱]:

$$\tau (m^{-1}) = aN \frac{Z^n}{E_\gamma^m} [1 - O(Z)] \quad (2-1)$$

که در آن، a یک ضریب ثابت و مستقل از Z و E_γ و m و n ثابت‌هایی با مقادیر بین ۳ تا ۵ هستند که مقدار آن‌ها به E_γ بستگی دارد و N تعداد اتم‌ها بر مترمکعب و Z عدد اتمی ماده است و $O(Z)$ جملاتی از مرتبه‌ی اول وابسته به Z می‌باشد. شکل ۱-۱ نشان می‌دهد که چگونه اثر فوتوالکتریک به صورت تابعی از E_γ و Z تغییر می‌کند. از روی رابطه‌ی ۱-۲ و این شکل درمی‌یابیم که اثر فوتوالکتریک برای مواد با Z بالا مهم‌تر است. همچنین این اثر در انرژی‌های پایین‌تر فوتون، در یک ماده مشخص، مهم‌تر است تا در انرژی‌های بالاتر [۱].

۱-۲-۲ پراکندگی کامپتون

اگر در برهم‌کنش فوتون با اتم، انرژی فوتون فرودی از مرتبه‌ی keV و انرژی بستگی الکترون از مرتبه‌ی eV باشد، می‌توانیم الکترون را نامقید فرض کنیم. پس از پراکندگی کامپتون، فوتون ناپدید نمی‌شود، بلکه فقط راستای حرکت و انرژی آن تغییر می‌کند. انرژی فوتون به مقدار معینی کاهش می‌یابد و به الکترون داده می‌شود. انرژی جنبشی الکترون با فرض این که پیش از برخورد ساکن بوده است عبارت است از:

$$T = E_\gamma - E'_\gamma \quad (3-1)$$

اگر فرض کنیم زاویه ی پراکندگی فوتون θ باشد، با توجه به رابطه ی بالا و در نظر گرفتن معادلات پایستگی، برای انرژی فوتون پراکنده خواهیم داشت:

$$E_{\gamma'} = \frac{E_{\gamma}}{1 + (1 - \cos \theta) E_{\gamma} / mc^2} \quad (4-1)$$

و برای انرژی جنبشی الکترون خواهیم داشت:

$$T = \frac{(1 - \cos \theta) E_{\gamma} / mc^2}{1 + (1 - \cos \theta) E_{\gamma} / mc^2} E_{\gamma} \quad (5-1)$$

برای مقادیر بیشینه و کمینه ی انرژی فوتون پراکنده شده و انرژی جنبشی الکترون، با در نظر گرفتن مقادیر صفر و π برای زاویه θ خواهیم داشت:

$$(6-1)$$

$$E_{\gamma', \min} = \frac{E_{\gamma}}{1 + 2E_{\gamma} / mc^2}$$

$$T_{\max} = \frac{2E_{\gamma} / mc^2}{1 + 2E_{\gamma} / mc^2} E_{\gamma}$$

$$E_{\gamma', \max} = E_{\gamma}$$

$$T_{\min} = 0$$

احتمال رخداد پراکندگی کامپتون را اصطلاحاً ضریب کامپتون یا سطح مقطع کامپتون می نامند. این ضریب تابع پیچیده ای از انرژی فوتون است، اما می توان آن را به صورت زیر نوشت [۱]:

$$\sigma \left(m^{-1} \right) = NZf(E_{\gamma}) \quad (6-1)$$

که در آن، σ احتمال رخداد برهم کنش کامپتون بر واحد راه پیموده است و $f(E_{\gamma})$ نیز تابعی از E_{γ} است. اگر چگالی اتم N را صریحاً بنویسیم، معادله ی بالا به صورت زیر در می آید:

$$\sigma \sim \rho \frac{N_A}{A} Zf(E_{\gamma}) \sim \rho \left(\frac{N_A}{A} \right) \frac{A}{2} f(E_{\gamma}) \sim \rho \frac{N_A}{2} f(E_{\gamma})$$

که در آن فرض شده برای بیش تر موارد به جز هیدروژن، $A \approx 2Z$ تا $A \approx 2,6Z$ است. با توجه به معادله ی بالا به این نتیجه می رسیم که احتمال رخداد پراکندگی کامپتون تقریباً مستقل از عدد اتمی ماده است. شکل ۱-۱ نشان می دهد که چگونه σ به صورت تابعی از E_{γ} و Z تغییر می کند.

۳-۲-۱ تولید زوج

تولید زوج، برهم کنشی است بین یک فوتون و یک هسته. بر اثر این برهم کنش، فوتون ناپدید می شود و یک زوج الکترون-پوزیترون آفریده می شود. هرچند که بر اثر این برهم کنش، هسته دستخوش هیچ تغییر دیگری

نمی‌شود، ولی حضور آن برای وقوع تولید زوج ضروری است. پایستگی انرژی، معادله‌ی زیر را برای انرژی جنبشی الکترون و پوزیترون به ما می‌دهد [۱،۲]:

$$T_{e^-} + T_{e^+} = E_{\gamma} - (mc^2)_{e^-} - (mc^2)_{e^+} = E_{\gamma} - 1,022 \text{ MeV} \quad (7-1)$$

برای تمام منظوره‌های عملی، الکترون و پوزیترون انرژی جنبشی حاصل را به تساوی بین خود تقسیم می‌کنند. تولید زوج، فوتون اولیه را حذف می‌کند، اما وقتی پوزیترون نابود می‌گردد، دو فوتون آفریده می‌شوند. احتمال رخداد تولید زوج، به نام ضریب تولید زوج یا سطح مقطع تولید زوج، تابع پیچیده‌ای از E_{γ} و Z است. این احتمال را می‌توان به صورت زیر نوشت [۳،۴]:

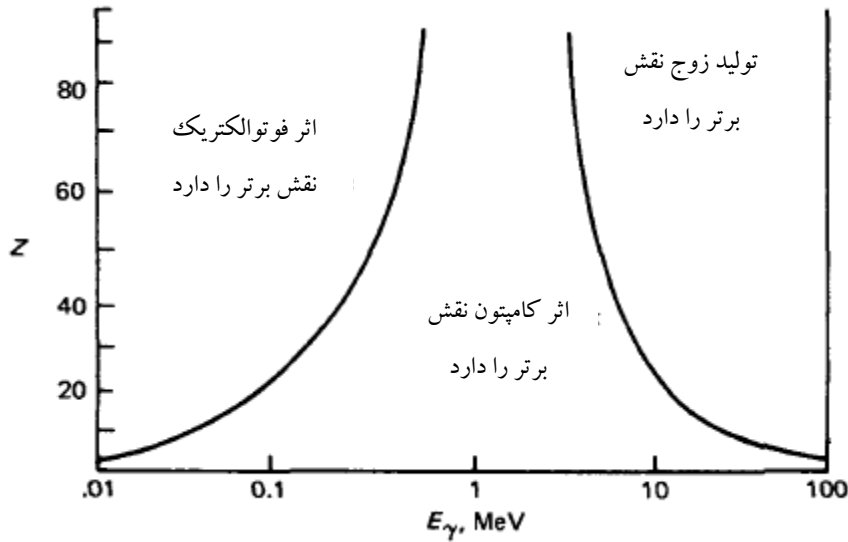
$$\kappa (m^{-1}) = NZ^2 f(E_{\gamma}, Z) \quad (8-1)$$

که در آن κ ، احتمال رخداد تولید زوج بر واحد راه پیموده و $f(E_{\gamma}, Z)$ ، تابعی است که اندکی با Z تغییر می‌کند و با افزایش E_{γ} ، افزایش می‌یابد. شکل ۱-۱ نشان می‌دهد که چگونه κ با E_{γ} و Z تغییر می‌کند. با دقت در شکل درمی‌یابیم که κ دارای آستانه‌ای در $1,022 \text{ MeV}$ است و با E_{γ} و Z افزایش می‌یابد. در میان سه ضریب τ و σ و κ ، فقط κ است که با افزایش انرژی فوتون، افزایش می‌یابد.

۱-۲-۴ ضریب تضعیف کل

وقتی یک فوتون درون ماده حرکت می‌کند، ممکن است از طریق هر یک از سه برهم‌کنشی که بحث شد، برهم‌کنش نماید. شکل ۱-۱ اهمیت نسبی سه برهم‌کنش یاد شده را وقتی که E_{γ} و Z تغییر می‌کنند، نشان می‌دهد. احتمال کل برهم‌کنش μ که اصطلاحاً ضریب تضعیف خطی کل نامیده می‌شود، برابر با حاصل جمع سه احتمال است:

$$\mu (m^{-1}) = \tau + \sigma + \kappa \quad (9-1)$$

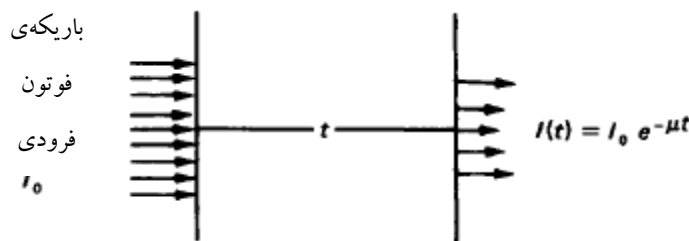


شکل ۱-۱: اهمیت نسبی سه برهم کنش عمده‌ی گاما [۱]

از نظر فیزیکی μ احتمال برهم کنش بر واحد فاصله است. اگر μ برحسب m^2/kg داده شود، آن را ضریب تضعیف جرمی کل می‌نامند. رابطه‌ی بین ضریب‌های خطی و جرمی به صورت $\mu(m^2/kg) = \mu(m^{-1})/\rho(kg/m^3)$ است. اگر یک باریکه‌ی موازی از پرتوهای گامای تک انرژی وارد ماده‌ای به ضخامت t شود، کسری از باریکه که بی‌هیچ برهم کنشی از ماده می‌گذرد برابر $e^{-\mu t}$ است (شکل ۱-۲). احتمال این که یک فوتون بدون هیچ برهم کنشی از ضخامت t بگذرد برابر است با تعداد فوتون‌های عبور کرده نسبت به تعداد کل فوتون‌های فرودی، یعنی نسبت $I_0 e^{-\mu t}$ به I_0 که برابر است با $e^{-\mu t}$. فاصله میانگین بین دو برهم کنش پیاپی موسوم به مسیر آزاد میانگین λ ، عبارت است از [۱،۲]:

$$\lambda(m) = \frac{\int_0^{\infty} x e^{-\mu x} dx}{\int_0^{\infty} e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu} \quad (10-1)$$

بنابراین، مسیر آزاد میانگین، به سادگی عبارت است از عکس ضریب تضعیف خطی کل.



شکل ۱-۲: شدت باریکه‌ی تراگسیلنده (فقط ذراتی که برهم کنش انجام نداده‌اند) به صورت نمایی با ضخامت

ماده کاهش پیدا می‌کند [۱]

۱-۲-۵ ضریب جذب انرژی فوتون

وقتی فوتون یک برهم کنش انجام می‌دهد، فقط بخشی از انرژی آن را محیط، در نقطه‌ای که برهم کنش صورت گرفته است جذب می‌کند. انرژی که فوتون به الکترون‌ها و پوزیترون‌ها می‌دهد، به عنوان انرژی جذب شده در نقطه‌ی برهم کنش تلقی می‌شود زیرا برد این ذرات باردار کوتاه است. با این همه، پرتوهای ایکس، فوتون‌های پراکنده شده توسط اثر کامپتون، یا گاما‌های نابودی ممکن است فرار کنند. کسر انرژی فوتونی که فرار می‌کند، وقتی اهمیت می‌یابد که بخواهیم گرمای ناشی از جذب گاما در مورد سپرهای حفاظتی یا دزتابی گاما به انسان را محاسبه کنیم. انرژی گامای ذخیره شده در هر ماده به کمک یک ضریب جذب انرژی محاسبه می‌گردد. ضریب جذب انرژی گاما، آن بخش از ضریب تضعیف کل است که وقتی در انرژی گاما ضرب شود، انرژی ذخیره شده در نقطه برهم کنش به دست می‌آید. معادله‌ی ۱-۱۰ ضریب تضعیف کل را می‌دهد. ضریب جذب انرژی μ_a عبارت است از [۱]:

$$\mu_a = \tau + \frac{T_{av}}{E_\gamma} \sigma + \kappa \quad (11-1)$$

که در آن T_{av} انرژی میانگین الکترون کامپتون، و μ_a ، بسته به یکاها یک ضریب جذب انرژی خطی یا جرمی است.

۱-۲-۶ ضریب‌های انباشت

بنابر شکل ۱-۳، یک چشمه‌ی همسانگرد نقطه‌ای گاما را در فاصله‌ای دور از آشکارساز در نظر می‌گیریم. کل باریکه‌ی گامایی که به آشکارساز برخورد می‌کند متشکل از دو مولفه است [۱]:

۱. باریکه‌ی ناپراکنده Φ_u مشتمل بر گاما‌هایی است که بی‌هیچ برهم کنشی، از سپر با ضخامت t می‌گذرند. اگر این چشمه، S گاما بر ثانیه گسیل کند، باریکه‌ی ناپراکنده به صورت زیر است:

$$\Phi_u \left(\frac{\gamma}{m^2 s} \right) = \frac{S}{\epsilon \pi r^2} e^{-\mu r}$$

۲. باریکه‌ی پراکنده‌ی Φ_s مشتمل است بر گاما‌های پراکنده و گاما‌های تولید شده از طریق برهم کنش

فوتون‌های فرودی (مثل پرتوهای ایکس و گاما‌های نابودی). محاسبه‌ی باریکه‌ی پراکنده آسان نیست و

هیچ عبارت ساده‌ای مثل معادله‌ی بالا وجود ندارد که نمایش‌گر آن باشد.

کل باریکه‌ای که به آشکارساز برخورد می‌کند عبارت است از: $\Phi_{tot} = \Phi_u + \Phi_s$. به جای محاسبه‌ی باریکه‌ی

پراکنده، این معادله را می‌توان بر حسب یک ضریب انباشت B به صورت $\Phi_{tot} = B \Phi_u$ نوشت. عموماً ضریب