دانشکده علوم–گروه فیزیک

کارشناسی ارشد فیزیک هسته‌ای

تعیین گستره اعتبار تقریب کرما در برآورد دز جذبی ناشی از چشمه‌های خارجی فوتون تک انرژی

استاد راهنما :

دکتر سید هاشم میری

دکتر رضا ایزدی

ارائه دهنده :

معصومه قورچی

شهریور ۱۳۸۸

چکیده

فصل اول: کاربرد چشمه فوتون و اهمیت دزیمتری آن

۱–۱مقدمه.....۲

۱–۱–۱ کاربرد پرتو فوتون در پزشکی.....۲

۱–۱–۲ کاربرد پرتو فوتون در صنعت.....۲

۱–۱–۳ کاربرد پرتو فوتون در کشاورزی و دامپروری.....۳

۱–۲– اندرکنش پرتو با بافت و اثرات بیولوژیکی آن.....۵

۱–۳ محاسبات دزیمتری.....۷

۱–۳–۱ ضرورت دزیمتری.....۷

۱–۴ کرما و دز جذبی.....۹

۱–۵ اهداف پایان نامه.....۱۱

۱–۶ نتایج.....۱۱

فصل دوم: انواع برهم‌کنش فوتون

۲–۱ مقدمه.....۱۴

۲–۲ انواع برهم‌کنش تابش گاما با ماده.....۱۴

۲–۲–۱ اثر فوتوالکتریک.....۱۵

۲–۲–۲ اثر کامپتون.....۱۷

۲–۲–۳ اثر تولید زوج.....۲۰

۲-۳ برهم‌کنش الکترون با ماده..... ۲۲
۲-۳-۱ برهم‌کنش الکترون با الکترون مداری..... ۲۳
۲-۳- ۲ برخورد الکترون با هسته..... ۲۴
۲-۴ دز جذبی و کرما..... ۲۵
۲-۴-۱ تفاوت دز جذبی و کرما..... ۲۶
۲-۵ برآورد دز جذبی..... ۲۷

فصل سوم: کد mcnpx

۳-۱ مقدمه..... ۳۰
۳-۱-۱ روش‌های محاسباتی در دزیمتری..... ۳۰
۳-۲ روش مونت کارلو..... ۳۱
۳-۳ کد mcnpx..... ۳۲
۳-۳-۱ به کارگیری کد mcnpx..... ۳۳
۳-۴ فایل ورودی برنامه..... ۳۶
۳-۴-۱ کارت سلول..... ۳۶
۳-۴-۲ کارت سطح..... ۳۷
۳-۴-۳ *کارت داده*..... ۳۸
۳-۴-۳-۱ *مدهای* ذره..... ۳۸
۳-۴-۳-۲ کارت اهمیت..... ۳۹
۳-۴-۳-۳ کارت چشمه..... ۴۱
۳-۴-۳-۴ کارت خروجی..... ۴۲

۳-۴-۳-۵ کارت ماده..... ۴۳
۳-۴-۳-۶ شرط پایان..... ۴۳
۳-۴-۴ برآورد خطا..... ۴۴

فصل چهارم: سیستم شبیه‌سازی شده و دلایل انتخاب آن

۴-۱ مقدمه..... ۴۶
۴-۲ هندسه سیستم..... ۴۷
۴-۳ انواع چشمه‌ها..... ۵۱
۴-۳-۱ هندسه چشمه‌های شبیه‌سازی شده..... ۵۲
۴-۳-۲ ذرات گسیلی از چشمه و انرژی آن‌ها..... ۵۴
۴-۴ ویژگی‌های بافت‌های بدن..... ۵۵
۴-۵ خروجی برنامه..... ۵۹
۴-۶ پایان برنامه..... ۶۵
۴-۷ نمونه برنامه شبیه‌سازی..... ۶۵

فصل پنجم:داده‌ها و نتایج آن‌ها

۵-۱ مقدمه..... ۶۹
۵-۱-۱ دز جذبی تحت تقریب کرما و دز جذبی واقعی..... ۷۰
۵-۱-۲ رفتار عمومی و همیشگی کرما و دز جذبی تحت شرایط مختلف..... ۷۶
۵-۱-۳ رفتار خاص دز جذبی و کرما تحت شرایط مختلف..... ۷۷

۵-۲ انرژی چشمه فوتون..... ۷۷

۵-۲-۱ اثر تغییر انرژی بر کرما و دز جذبی..... ۷۸

۵-۲-۲ اثر انرژی بر تفاوت نسبی کرما و دز جذبی..... ۸۰

۵-۲-۳ اثر انرژی بر تغییرات نسبی کرما..... ۸۳

۵-۲-۴ اثر انرژی بر تغییرات نسبی دز جذبی..... ۸۵

۵-۳ انواع بافت بدن..... ۸۷

۵-۳-۱ دز جذبی و کرما در بافت‌های مختلف..... ۸۸

۵-۳-۲ اثر تغییر بافت بر تفاوت دز جذبی و کرما..... ۸۹

۵-۳-۳ اثر تغییر بافت بر تغییرات نسبی کرما..... ۹۱

۵-۳-۴ اثر تغیییر بافت بر تغییرات نسبی دز جذبی..... ۹۶

۵-۴ هندسه چشمه..... ۹۸

۵-۴-۱ اثر هندسه چشمه بر دز جذبی و کرما..... ۹۸

۵-۴-۲ اثر هندسه چشمه بر تفاوت نسبی دز جذبی و کرما..... ۱۰۱

۵-۴-۳ اثر هندسه چشمه بر تغییرات نسبی کرما..... ۱۰۳

۵-۴-۴ اثر هندسه چشمه بر تغییرات نسبی دز جذبی..... ۱۰۷

۵-۵ مقایسه دز جذبی و کرما در بافت‌ها، انرژی‌ها و چشمه‌های مختلف..... ۱۱۳

فصل ششم: تحلیل فیزیکی نتایج

۶- مقدمه..... ۱۱۷

۶-۱ برهم‌کنش فوتون با محیط..... ۱۱۸

۶-۲ کاهش کرما با افزایش فاصله از چشمه..... ۱۲۰

۶-۲-۱ اثر انرژی بر کرما و تغییرات آن.....۱۲۲
۶-۲-۲ اثر تغییر بافت بر کرما و تغییرات آن.....۱۲۲
۶-۲-۳ اثر هندسه چشمه بر کرما و تغییرات آن.....۱۲۴
۶-۳ رفتار خاص دز جذبی.....۱۲۷
۶-۳-۱ اثر انرژی و بافت بر دز جذبی و تغییرات آن.....۱۳۰
۶-۳-۲ اثر هندسه چشمه بر دز جذبی و تغییرات آن.....۱۳۱
۶-۴ تفاوت نسبی دز جذبی و کرما.....۱۳۶
۶-۴-۱ اثر انرژی، بافت و هندسه چشمه بر تفاوت دز جذبی و کرما.....۱۳۷

فصل هفتم:داده‌ها و نمودارهای آن‌ها

۷-۱ بافت سخت.....۱۴۳
۷-۲بافت نرم.....۱۵۹
۷-۳ بافت شش.....۱۷۵

فصل اول

کاربرد چشمه فوتون و اهمیت دزیمتری آن

۱-۱ مقدمه

با پیشرفت فناوری و گسترش نیازهای بشری، کاربرد پرتوها به یک مساله اساسی در زندگی روزمره تبدیل شده است. از میان تابش‌های مختلف هسته‌ای، پرتو گاما ویژگی‌هایی دارد که آن را از بقیه تابش‌ها متمایز می‌کند. برخی از این ویژگی‌ها عبارتند از:

۱- گاما بدون بار است و طول موج کمی دارد.

۲- عمق نفوذ آن در ماده زیاد است.

۳- چشمه‌های گاما در دسترس هستند.

۴- معمولا اندرکنش‌های آن از نوع اتمی است، بنابراین سطح مقطع‌های اندرکنش ایزوتوپ‌های متفاوت یک عنصر با فوتون یکسان است.

با توجه به این ویژگی‌هاست که پرتوهای گاما کاربردهای گسترده‌ای در پزشکی و کشاورزی و صنعت پیدا کرده است. در زیر به بخشی از این کاربردها اشاره می‌شود.

۱-۱-۱ کاربرد در پزشکی

استفاده از پرتوهای در تشخیص و درمان بیماری (پزشکی هسته‌ای) بخشی از کاربردهای پرتوها در عرصه پزشکی است. از رادیو ایزوتوپ‌ها برای تشخیص ودرمان بیماری‌ها در سطح سلولی، مولکولی، استفاده در تست هورمونی در آزمایشگاه‌ها، درمان سرطان‌ها، درمان پر کاری تیروئید، سرطان شناسی، تشخیص بیماری‌های قلب و عروق و.....استفاده می‌شود. پیشرفت روش‌های فیزیک هسته‌ای تجربی به طور همزمان تصویربرداری پزشکی را هم گسترش داده است: دوربین‌های پرتو گاما، شتاب دهنده‌های مخصوص برای تولید رادیو ایزوتوپ و روش‌های اعجاب انگیز برای به دست آوردن تصاویر اعماق مشخص بدن از آن جمله‌اند. با روش spect با دقت و حساسیت بالا تصاویر سه بعدی از اعضای مختلف بدن از جمله قلب تهیه می‌شود. مفیدترین رادیونوکلیدها در پزشکی هسته‌ای آن‌هایی هستند که پرتوهای گاما گسیل می‌کنند چرا که پرتوهای گاما قابلیت نفوذ بیشتری دارند. یک عنصر پرتوزا گسیل‌کننده گاما را که درون بدن است می‌توان از بیرون بدن شناسایی کرد. علاوه بر این‌ها در ضد عفونی و استریل کردن تجهیزات پزشکی نیز به طور گسترده استفاده می شوند.

۱-۱-۲ کاربرد در صنعت

پرتوها کاربردهای گسترده‌ای در صنعت نیز دارند برخی از این کاربردها عبارتند از:

۱-نشت‌یابی با استفاده از پرتو

۲- چگالی سنج مواد معدنی با پرتو

۳- فرآوری مواد پلیمری جهت بهبود خواص فیزیکی و مکانیکی

۴-برآورد میزان سائیدگی ماشیت آلات در اثر اصطکاک

۱-۱-۳ کاربرد در کشاورزی و دامپروری

از دیگر استفاده‌های پرتوهای گاما در بخش کشاورزی و دامپروری است. ایجاد تنوع ژنتیکی درگیاهان، به نحوی که گیاهان محصول بیشتری با کیفیت بالاتر در خاک‌های سخت‌تر و کم آب‌تر داشته باشند. هم‌چنان‌که این مساله برای گل‌های زینتی همچون گلایل و برای محصولات کشاورزی همچون برنج به‌کار گرفته شده است. از دیگر کاربردها:

۱- ایجاد جهش ژنتیکی برای داشتن میوه‌های مقاوم‌تر

۲- سترون سازی محصولات کشاورزی، باغات و محصولات غذایی و بهداشتی در بسته‌بندی‌ها و مواد پسمان از طریق حذف باکتری‌ها و میکرب‌ها

۳- حشره‌زدایی و حذف جانوران موذی از محصولات کشاورزی

روش‌های هسته‌ای در حوزه دامپزشکی موارد مصرفی چون تشخیص و درمان بیماری‌های دامی، تولید مثل دام، اصلاح نژاد دام، تغذیه، بهداشت و ایمن‌سازی محصولات دامی و خوراک دام دارد.

مزایای کاربردهای پرتو فرآوری در مقایسه با روش‌های دیگر عبارتند از :

- قابلیت تنظیم دقیق دز و قدرت نفوذ پرتو گاما در مواد مورد نظر
- امکان توزیع یکنواخت دز در فرآیند سترون سازی

• کنترل ساده روش پرتو فرآوری (آزمایشهای میکروبیولوژی و دزیمتری)

• قابلیت سترون سازی محصولات بسته بندی شده با پوشش‌های مختلف

• سرعت و امکان استفاده محصول بلافاصله پس از فرآیند

• بررسی قابلیت‌های انعطاف کاربری سیستم (چشمه)

• سازوکار ذاتی کشندگی میکرو ارگانیسم‌ها، توسط پرتوها بدون ایجاد پسمان و یا پرتوزدایی

در پرتو فرآوری از اشعه پر نفوذ گاما ناشی از چشمه‌های پرتوزا و یا از باریکه الکترون‌های پر انرژی استفاده می‌شود. پرتو گاما با توانایی‌های ویژه، به راحتی از هر نوع پوشش اعم از فلزی، چوبی، پلاستیکی و کاغذی عبور نموده و پس از برخورد با میکروارگانیسم‌ها سبب کاهش بار میکروبی می‌گردد. این پرتوها تقریبا با سرعت نور حرکت کرده و طی برخوردها و بمباران اهداف، باکتری‌ها را در محصولات و داخل بسته‌بندی‌های خود از بین می‌برند. بدین طریق محصولات پرتودهی داده شده تا زمان باز کردن بسته بندی‌ها استریل باقی می‌مانند.

پرتوهای گاما و ایکس و باریکه‌های الکترونی عینا شبیه مکانیزم اثر یونیزاسیون، محصولات را استریل می‌کنند. تنها تفاوت بین پرتودهی با الکترون‌ها و سایر روش‌های پرتودهی در عمق نفوذ آن‌ها است. از آن‌جایی که الکترون‌ها دارای جرم و بار هستند، عمق نفوذ آن‌ها بسیار کمتر از پرتوهای گاما یا ایکس فاقد بار الکتریکی و تقریباً بدون جرم هستند. بر این اساس در کاربرد باریکه‌های الکترونی لازم است محدودیت‌هایی را در مورد اندازه و ابعاد جعبه‌های محصول رعایت نمود در حالی که با اشعه گاما می‌توان محصولات با چگالی و یا حجم بیشتر را نیز پرتودهی کرد.

۱-۲- اندرکنش پرتو با بافت و اثرات بیولوژیکی آن

برهم‌کنش تابش با سیستم‌های بیولوژیکی باعث ایجاد تغییرات مختلفی می‌گردد که می‌توانند مضر یا مهلک باشند. اثرات قطعی بیولوژیکی پرتوها معمولاً زمانی بروز می‌کند که پرتوگیری از حد آستانه مجاز تعریف شده، بیشتر باشد. ملتهب شدن پوست، تغییرات خونی، آب مروارید و... از اثرات قطعی پرتوها هستند. اما اثرات احتمالی پرتوها، اثراتی هستند که برای بروز آن‌ها معمولاً آستانه مجاز تعریف شده وجود ندارد، نظیر سرطان‌های مختلف و عوارض سوء آن روی نسل‌های آینده.

بافت‌های بدن از نظر آسیب پذیری در مقابل پرتو، به دو گروه بافت‌های حساس و بافت‌های مقاوم به پرتو تقسیم‌بندی می‌شوند. بافت‌های حساس به پرتو عبارتند از مغز استخوان، سلول‌های جنسی، بافت‌های لنفاوی، مخاط دستگاه گوارش و گلو، اپیدرم پوست و فولیکول‌ها. بافت‌های مقاوم به پرتو نیز عبارتند از استخوان‌ها و بافت‌های استخوانی، عضلات و بافت‌های عضلانی و بافت عصبی.

پرتو به دو صورت مستقیم و غیر مستقیم بر روی ارگانیسم‌های زنده اثر می‌گذارد. اثرات غیر مستقیم پرتو در نتیجه واکنش پرتو با آب موجود در محیط و تولید رادیکال آزاد می‌باشد که سبب تغییر در ترکیبات دیواره سلولی و اثر سوء برآنزیم‌های فعال و در نهایت موجب مرگ سلول می‌شود. ساختمان سلول بدن انسان از دو قسمت سیتوپلاسم و هسته تشکیل شده که به وسیله غشا و پلاسمایی احاطه شده است. اثر رادیوشیمی هم از آثار غیرمستقیم پرتو بر سلول است که موجب تغییرات در اجزای شیمیایی آن می‌شود به نحوی که مولکول‌های یونیزه شده با عناصر شیمیایی مشابهی که قبلاً یونیزه شده‌اند، وارد عمل می‌شوند.

عوارض مربوط به اثر مستقیم آن، ناشی از تخریب RNA و DNA می‌باشد. ایجاد وقفه در تقسیم سلولی، جهش ژنی، شکست کروموزومی و مرگ سلولی، از جمله اثرات مستقیم پرتو بر سلول است. از خاصیت مرگ سلولی در اثر پرتو، در پرتو درمانی برای از بین بردن سلول‌های سرطانی و درمان تومورهای بدخیم استفاده می‌شود. پرتوگیری با دوز زیاد در مدت زمان بسیار کم باعث بروز اثرات بیولوژیکی نظیر تاول مرطوب، مرگ سلولی، اثرات روی عناصرخونی، اثرات روی سلول‌های جنسی و اثرات روی جنین می‌شود.

به طور مثال برخورد پرتو با سلول‌های جنسی می‌تواند باعث کاهش تعداد آن‌ها شده، عقیمی موقت و حتی عقیمی دائم را نیز به دنبال داشته باشد. همچنین پرتوهای یون‌ساز در جنین می‌تواند موجب سقط جنین، عقب ماندگی ذهنی، لوسمی، ایجاد فتق، نقص کلیه، ناموزون بودن دندان‌ها، ناهنجاری‌های اسکلتی، کوتاهی قد و سایر ناهنجاری‌های جسمی و روانی شود. اگر تمام بدن تحت تاثیر پرتو با دوز بالا قرار گیرد، ممکن است اثرات آن بر هریک از اعضای بدن، یکجا بروز کند.

علاوه بر این پرتوگیری درازمدت با دوز کم که ممکن است اثرات آن بعدها مشاهده شود را پرتوگیری مزمن و اثر ناشی از آن را اثرات تاخیری نظیر بروز سرطان می‌نامند. اثر عمومی پرتو روی اعضای مختلف بدن تقریباً متفاوت است و در برخی از اعضای بدن شدید و در برخی خفیف‌تر است[۱].

۱-۳- دزیمتری و ضرورت آن

کاربرد روزافزون پرتوها به خصوص در پزشکی، روش‌های جدید پرتودرمانی، اثرات رادیو بیولوژیکی ناشی از پرتوگیری بافت‌های سالم و توزیع بهینه دز در ناحیه درمانی، لزوم دقت در استفاده از پرتوها را افزایش داده است. به این ترتیب روش‌های مختلف دزیمتری مورد توجه قرار گرفته‌اند. با وجود اینکه کاربرد پرتوهای یونیزان و غیر یونیزان در امور مختلف مفید و در پاره‌ای موارد منحصر به فرد است، لیکن عدم رعایت نکات ایمنی می‌تواند خطرات جدی برای کارکنان، مردم، محیط زیست و حتی نسل آینده به همراه داشته باشد. آن‌چه که در این میان حایز اهمیت است، کنترل و کسب اطمینان از کاربرد صحیح آن و در نهایت پیشگیری از اثرات سوء بیولوژیکی و زیست محیطی ناشی از کاربرد پرتوهاست.

هدف اصلی در درمان با پرتو، انتقال انرژی پرتوهای یونیزان به جسم هدف و حفاظت بافت‌های سالم مجاور آن تا حد ممکن است. هدف در این مرحله کاهش دوره درمان و افزایش دقت فرآیند درمان است. این مهم باعث پیچیدگی بیشتر طراحی و لزوم افزایش دقت محاسبات شده است. امروزه روش‌های مختلف محاسباتی و تجربی برای برآورد دز ارائه شده است.

۱-۳-۲ روش‌های دزیمتری

روش‌های مختلفی برای دزیمتری گاما ارائه شده‌اند. این روش‌ها را می توان در دو دسته کلی تجربی و محاسباتی قرار داد. روش‌های تجربی عموما دارای خطای سیستماتیک بالایی هستند. بنابراین روش‌های محاسباتی مناسبترند و از همین روست که این روش‌ها امروزه بسیار گسترش یافته‌اند.

یکی از بهترین روش‌های محاسباتی روش مونت کارلو است. روش مونت کارلو، فرایندی احتمالی است که شبیه‌سازی ترابرد ذره در هر هندسه دلخواه را امکان‌پذیر می‌سازد. در حالی که بسیاری کدهای محاسباتی، معادله ترابرد ذره را برای یک ذره میانگین حل می‌کنند، مونت کارلو حل را بوسیله شبیه‌سازی کردن ذرات منفرد بدست می‌دهد و سپس رفتار میانگین را استنتاج می‌کند.

در محاسبات دزیمتری با دو مفهوم دز جذبی و کرما روبرو هستیم.

۱-۴ کرما و دز جذبی

انرژی جذب شده از تابش یوننده در واحد جرم ماده هدف را دز جذبی می‌نامند. انرژی که از ذرات غیر باردار نظیر فوتون به ذرات باردار منتقل شده کرما نامیده می‌شود. کرما تقریبی از دز جذبی است که در آن فرض می شود تمام انرژی منتقل شده از فوتون به ذرات باردار، توسط این ذرات در همان نقطه تولید آن‌ها در محیط ذخیره شده است. واحد دز جذبی Jkg^{-1} و نام اختصاصی آن Gray است. کرما و دز جذب شده با هم متفاوتند. در انرژی‌های پایین می‌توانیم آن‌ها را معادل بگیریم، اما در انرژی‌های بالا این دو برابر نیستند.

در کرما هنگامی که که فوتون با اتم‌های محیط برخورد می‌کند صرف‌نظر از اینکه نوع برخورد کامپتون، فوتوالکتریک و یا تولید زوج باشد در هر صورت تمام انرژی که ذرات ثانویه ناشی از برهم‌کنش پیدا کرده‌اند را انرژی جذب شده در محیط فرض می‌کند. بنابراین ذرات ثانویه ترابرد نمی‌شوند و برهم‌کنش‌های این ذرات ثانویه با محیط اهمیت نداشته و دنبال نمی‌شود.

در انرژی‌های بالا احتمال اینکه ذره ثانویه از محیط خارج شود زیاد است و در این صورت بخشی از انرژی را با خود خارج کرده و همه انرژی آن در محیط مورد نظر جذب نشده است. این مساله باعث می‌شود در انرژی-های بالا کرما بیشتر از دز جذبی واقعی در آن محیط باشد.

ذرات باردار باید هزاران برخورد نمایند تا بالاخره همه انرژی خود را در محیط از دست داده و جذب شوند. در محاسبات کامپیوتری، ترابرد نشدن ذرات ثانویه باعث می‌شود زمان انجام محاسبات کوتاهتر باشد. پس در جایی که بتوان دزجذبی و کرما را برابر دانست، این نکته یک مزیت محسوب می‌شود. اما همان‌طور که گفته شد در انرژهای بالا دز جذبی تحت تقریب کرما برابر دز جذبی واقعی نبوده و هرچه اختلاف آن با دز جذبی بیشتر باشد تحت این شرایط کرما بی‌اعتبارتر است.

بنابراین اهمیت دارد که بتوانیم تحت شرایط مختلف محدوده اعتبار کرما را بدست آوریم.

۱-۵ اهداف پایان نامه

با توجه به اهمیت دزیمتری دقیق به‌خصوص در کاربردهای پزشکی، در این پایان نامه سعی شده است با استفاده از فانتوم ICRU، دزیمتری دقیقی در بازه انرژی ۱ MeV تا ۱۰۰ MeV برای چشمه نقطه‌ای همسانگرد، باریکه فوتون و چشمه مسطح و در بافت نرم و بافت سخت و بافت شش انجام شود. عناصر بافت‌ها و تعداد آن‌ها از گزارش ICRU تهیه شده است.

هدف برآورد دز جذبی با استفاده از روش تقریب کرما و روش ترابرد الکترون حاصل از برهم‌کنش سه گانه فوتون با ماده، با استفاده از محاسبات مونت کارلو MCNPX 2.4.0 است.

در این پایان نامه سعی شده است که محدوده اعتبار کرما بر اساس انرژی فرودی، هندسه چشمه و نوع بافت تعیین شود. دلایل فیزیکی بدست آمدن این محدوده اعتبار، به طور کامل مورد بحث قرار گرفته است. اثر پارامترهای مختلفی همچون هندسه چشمه، نوع بافت و انرژی چشمه بر رفتار دز جذبی و کرما مورد بررسی قرار گرفته است.

سعی شده میزان خطای کرما یعنی تفاوت دز جذبی تحت تقریب کرما و دز جذبی واقعی، تحت پارامترهای مختلف بدست آید.

۱-۶ نتایج

برای هرسه هندسه چشمه و همه بافت‌ها و انرژی‌ها، کرما همواره با افزایش فاصله از چشمه کاهش می‌یابد. برای همه چشمه‌ها، بافت‌ها و انرژی‌ها، دز جذبی با افزایش فاصله از چشمه، ابتدا زیاد می‌شود. دز جذبی در یک فاصله خاص از چشمه بیشینه شده و از این فاصله خاص به بعد، کاهش می‌یابد. در واقع دز جذبی در همه شرایط محاسبه شده دارای یک قله است.

مقدار بیشینه دز جذبی و فاصله نقطه **بیشینه شدن دز جذبی از چشمه**، کاملا به انرژی و شکل چشمه و نوع بافت وابسته است.

فاصله‌ای از چشمه که در آن دز جذبی بیشینه شده، با افزایش انرژی افزایش می‌یابد. با افزایش چگالی محیط کاهش می‌یابد. پس فاصله‌ای از چشمه که در آن دز جذبی بیشینه می‌شود در بافت شش بیشتر از بافت نرم و در بافت نرم بیشتر از بافت سخت است.

در انرژی و هندسه چشمه یکسان کرمای بافت شش بیشتر از کرمای بافت نرم و کرمای بافت نرم بیشتر از کرمای بات سخت است در حالی برای دز جذبی واقعی در همان شرایط، دز جذبی بافت سخت بیشتر از دز جذبی بافت نرم و دز جذبی بافت نرم بیشتر از دز جذبی بافت شش است.

فاصله‌ای از چشمه که در آن دز جذبی بیشینه شده با تغییر هندسه چشمه، تغییر می‌کند.

در سلول‌های اولیه در هر انرژی، کرما و دز جذبی باریکه فوتون بیشتر از کرما و دز جذبی چشمه نقطه‌ای و کرما و دز جذبی چشمه نقطه‌ای بیشتر از کرما و دز جذبی چشمه مسطح است. در سلول‌های بعدی، کرما و دز جذبی باریکه فوتون بیشتر از کرما و دز جذبی چشمه مسطح و کرما و دز جذبی چشمه مسطح بیشتر از کرما و دز جذبی چشمه نقطه‌ای است.

در یک انرژی خاص و چشمه خاص، تفاوت دز جذبی و کرما در سلول اول که نزدیکترین فاصله از چشمه را دارد، در بافت شش تفاوت بیشتری از بافت نرم و در بافت نرم بیشتر از بافت سخت است. هر چه تفاوت کرما و دز جذبی در یک محیط بیشتر باشد کرما در آن محیط نامعتبرتر است.

یعنی اعتبار کرما در بافت شش کمتر از بافت نرم و در بافت نرم کمتر از بافت سخت است.

تفاوت دز جذبی و کرما با افزایش فاصله از چشمه کاهش یافته و از یک فاصله خاص از چشمه به بعد نوسانات کمتر از ۳ درصد حول یک مقدار ثابت می‌یابد. در انرژی‌های بالاتر، این مقدار ثابت برای چشمه مسطح و چشمه نقطه‌ای همچنان نزدیک به صفر است و برای باریکه فوتون نزدیک به صفر نیست. با افزایش انرژی، در بافت و چشمه یکسان، در فاصله برابر از چشمه، تفاوت دز جذبی و کرما افزایش می‌یابد.

با افزایش انرژی، فاصله ای از چشمه که از آن به بعد، دز جذبی و کرما نوسانات کمتر از سه درصد حول یک مقدار ثابت می‌یابند، افزایش پیدا می‌کند.

در هر بافت و در هر انرژی تفاوت نسبی دز جذبی و کرما برای چشمه نقطه‌ای همسانگرد کمی بیشتر از تفاوت نسبی دز جذبی و کرمای باریکه فوتون و تفاوت نسبی دز جذبی و کرمای باریکه فوتون کمی بیشتر از تفاوت نسبی دز جذبی و کرمای چشمه مسطح است.

یعنی در شرایط یکسان انرژی و بافت، کرمای چشمه مسطح اعتبار کمتری از کرمای باریکه فوتون و کرمای باریکه فوتون اعتبار کمتری از کرمای چشمه نقطه‌ای همسانگرد دارد.

از یک فاصله خاص از چشمه به بعد، تفاوت دز جذبی و کرما و به عبارتی خطای تقریب کرما به حداقل مقدار خود می‌رسد.

در واقع بر خلاف آن که در انرژی‌های بالا، تقریب کرما فاقد اعتبار دانسته می‌شود، می‌توان در هر انرژی فاصله‌ای از چشمه را داشت که از آن به بعد این تقریب معتبر است.

بنابراین رفتار کلی دز جذبی و کرما در شرایط مختلف با هم مقایسه شده و حد اعتبار کرما و میزان خطـای کرمـا نسبت به دز جذبی و تغییرات نسبی کرما و دز جذبی تحت شرایط مختلف، در هر بافت و هر انرژی و برای هـر هندسه چشمه، بدست آورده شده است.

فصل دوم

انواع برهم‌کنش فوتون و برآورد دز جذبی و کرما

۲-۱ مقدمه

تابش گاما به تابش الکترومغناطیسی با منشا هسته‌ای اطلاق می‌شود. تابش گاما معمولا دارای طول موجی کمتر از 10^{-5} F یا انرژی فوتونی بیشتر از ۰/۱ MeV است. برهم‌کنش آن با محیط به صورت‌های فوتوالکتریک، کامپتون و یا تولید زوج است[۲].

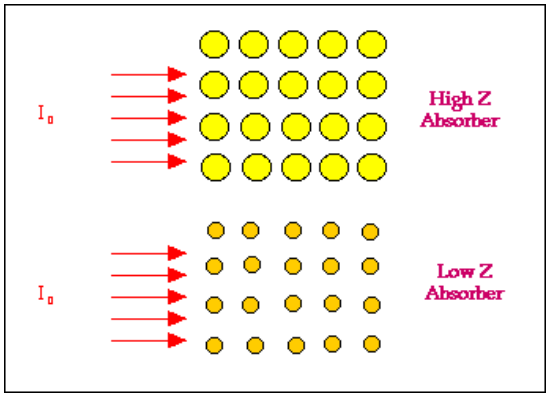
در همه برهم‌کنش‌های فوتون عاملی که انرژی را در محیط ذخیره می‌کند، الکترون است. در برهم‌کنش فوتو الکتریک، از الکترون‌های مقید اتم‌های محیط کنده شده و در بر هم‌کنش کامپتون، الکترونهای نامقید پس زده شده و در برهم کنش تولید زوج، الکترون و پوزیترون تولید شده است.

۲-۲- برهم‌کنش تابش گاما با ماده

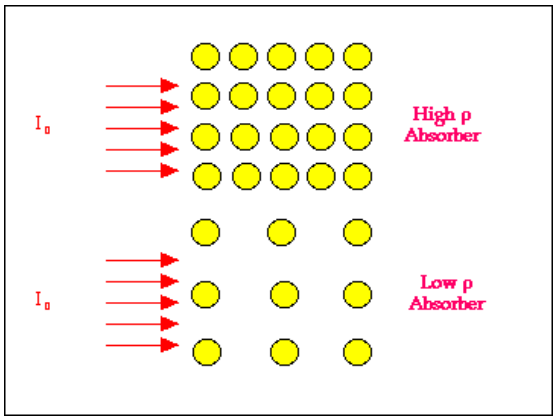
تضعیف باریکه‌ای از پرتوهای گاما در عبور از یک ماده به این صورت است که هر پرتو گاما یا ابدا برهم‌کنشی با ماده ندارد، و یا توسط جذب یا پراکندگی به کلی از باریکه جدا می‌شود. این باعث یک تضعیف نمایی در شدت پرتو با ازدیاد ضخامت جاذب می‌گردد.

احتمال اینکه فوتون بتواند تا فاصله X در ماده‌ای با چگالی ρ بدون هیچ گونه تضعیفی عبور کند با تابع نمایی $e^{-\mu x}$ داده می‌شود. اگر تعداد I_0 پرتو گاما در واحد زمان به‌طور عمود بر یک جاذب بتابد، تعداد پرتوهای گاما که بدون برهم‌کنش از جاذب خارج می‌شوند از رابطه $I = I_0 e^{-\mu x}$ بدست می‌آید.

چون تضعیف توسط سه فرآیند مستقل کامپتون، فوتوالکتریک و تولید زوج صورت می‌گیرد، می‌توان نوشت $\mu = \mu_c + \mu_e + \mu_p$ که در آن هر ضریب تضعیف جزیی، متناسب با تعداد اتم‌ها در واحد حجم جذب‌کننده است. ضریب تضعیف خطی μ ، که احتمال رویداد تضعیف یک فوتون در واحد طول مسیر تعریف می‌شود، همان‌طور که در شکل‌های ۲-۱ و ۲-۱ نشان داده شده است، وابسته به انرژی فوتون، عدد اتمی و چگالی محیط است.



شکل۲- ۱ وابستگی μ به عدداتمی



شکل۲- ۲ وابستگی μ به چگالی

وابستگی به چگالی با تقسیم μ به چگالی محیط، حذف می‌شود. از این رو بهتر است از ضریب جذب جرمی $\frac{\mu}{\rho}$ استفاده کنیم. در بیشتر کتابخانه‌های موجود نیز از این تعریف استفاده شده است.

۲-۲-۱- اثر فوتوالکتریک

در اثر فوتوالکتریک فوتون با انرژی E در اتم محیط نفوذ کرده و به یکی از الکترون‌های لایه داخلی که با انرژی بستگی BE به اتم مقید است، ضربه می‌زند. در اثر این برهم‌کنش فوتون نابود می‌شود و الکترون با انرژی جنبشی T=E-BE از اتم به بیرون