

بررسی عملکرد یک آشکارساز گازی استوانه‌ای با استفاده از کد Geant4

محمد مهدی ناصری^۱، طیب کاکاوند^۲، کیومرث کمالی مقدم^۱، منا درخوش^{۲*}، بهادر

شریفی^۲، علیرضا توسلی^۱

^۱ سازمان انرژی اتمی ایران - پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای - پژوهشکده علوم هسته‌ای

^۲ دانشگاه زنجان، گروه فیزیک

چکیده: در این مقاله نحوه عملکرد یک آشکارساز گازی استوانه‌ای با طول 0.5 متر و قطر 0.12 متر پر شده با گاز $P10$ ، توسط شبیه‌سازی با کد $Geant4$ برای اولین بار مورد بررسی قرار گرفته است. پاسخ این شمارنده در ولتاژهای متفاوت نشان می‌دهد که این شمارنده می‌تواند در انرژیهای فوتون زیر 60 keV بصورت شمارنده تناسبی استفاده شود. بهترین ولتاژ کار برای این شمارنده بین 400 تا 1000 ولت بدست آمده است. حساسیت این شمارنده برای فوتونهای با انرژی بالای 60 keV تقریباً یکسان است. از اطلاعات کلی این تحقیق میتوان در ساخت شمارنده‌ها استفاده نمود.

واژگان کلیدی: آشکارساز گازی - $Geant4$ - میدان الکتریکی شعاعی - تخلیه انرژی - یونیزاسیون - تکثیر گازی

مقدمه

$Geant4$ بعنوان یک ابزار در زمینه شبیه‌سازی آشکارسازهای ذرات هسته‌ای، دارای قابلیت‌های زیادی است [۱]. این کد از دو مطالعه کاملاً مستقل از هم که در دو مرکز متفاوت CERN و KEN در سال ۱۹۹۳ در حال انجام بود تولید شده است. برای انجام آزمایشات پیچیده فیزیک هسته‌ای، $Geant4$ بعنوان ابزار جدیدی که بر اساس روش شیء گرا (Object-Oriented) پایه ریزی شده است متولد گردید. این کد دامنه وسیعی از مولفه‌های نرم افزاری لازم که می‌توانند در کاربردهای متفاوتی به کار بروند، تهیه کرده است. وسعت این دامنه از شبیه‌سازی پدیده‌های بسیار ساده تا شبیه‌سازی آشکارسازهای بسیار پیشرفته مانند آزمایشات LHC (Large Hadron Collider) می‌باشد.

* آدرس: دانشگاه زنجان - کیلومتر ۵ جاده تبریز

پست الکترونیک: darkhosh83@yahoo.com

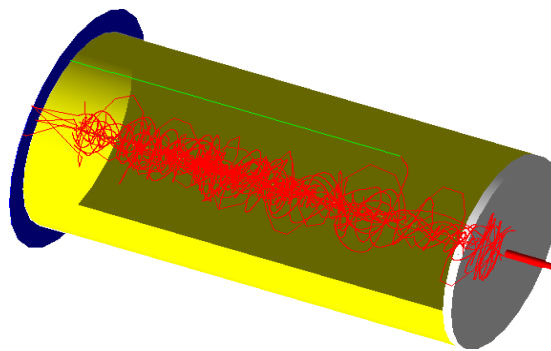
تمامی پروسه های شبیه سازی لازم با تعریف دقیق مولفه های کامپیوتری در این کد در نظر گرفته شده است. از آن جمله میتوان به هندسه سیستم، مواد، ذرات بنیادی، تولید ذرات ثانویه، مسیر حرکت ذرات در ماده، میدان الکترومغناطیسی خارجی، پروسه های فیزیکی موجود در برخورد بین ذرات با ماده، ذخیره داده ها و برخوردها، نمایش آشکارساز و مسیر حرکت ذرات و حتی نوع سیستم عامل کامپیوتری که عمل شبیه سازی را انجام می دهد اشاره نمود. مشکل اساسی که در برنامه های شبیه ساز دیگر وجود دارد، مشکل اضافه کردن مدل های فیزیکی جدید و متفاوت به برنامه است. این مشکل ناشی از پیچیدگی های موجود و محدودیت های برنامه می باشد. در حالی که با روش شی گرا می توان با استفاده از تعریف کردن اصولی یکسان برای تمامی مدل های فیزیکی این پیچیدگی ها را از بین برد. ذرات اولیه ایجاد شده در برخوردها در این برنامه میتوانند از چشمه های داخلی و یا از چشمه های خارجی بدست آیند [۲].

مقدار انرژی تخلیه شده (Energy Deposition) توسط پرتوهای هسته ای در حین عبور از ماده تشکیل دهنده آشکارساز، یکی از پارامترهائی است که برای بررسی عملکرد آن آشکارساز حائز اهمیت است. این پارامتر را می توان با استفاده از این شبیه ساز بدست آورد از جمله می توان به تصویر برداری اشعه X با استفاده از فیبر نوری پلاستیکی [۳] اشاره کرد. کارهای کمی در زمینه آشکارسازهای گازی با استفاده از Geant4 صورت گرفته است. به عنوان مثال اندازه گیری قطبش اشعه X با استفاده از روش شبیه سازی جدیدی برای آشکارسازهای گازی [۴]. در عملکرد یک آشکارساز گازی با هندسه استوانه ای، عواملی چون نوع گاز، فشار گاز، قطر و جنس بدنه، قطر و جنس آند و همچنین ولتاژ اعمال شده نقش اساسی را ایفا می کنند. برای پیدا کردن رفتار یک آشکارساز گازی، لازم است که تغییرات رفتار آشکارساز با تغییرات این عوامل مورد بررسی قرار گیرد. اصول اساسی کار اغلب آشکارسازهای تابش هسته ای مشابه است. تابش وارد آشکارساز می شود، با اتم های ماده آشکارساز برهمکنش می کند و تعداد زیادی الکترونها کم انرژی را از مدارهای اتمی خود آزاد می کند. این الکترونها جمع آوری می شوند و جهت تحلیل توسط مدارهای الکترونیکی به صورت یک تپ ولتاژ یا جریان الکتریکی در می آیند [۵]. شمارنده های گازی در سه ناحیه اتاقک یونش، تناسبی و گایگر - مولر کار میکنند. در ناحیه تناسبی الکترونها که سرعت بالایی در نزدیکی سیم آند پیدا کرده اند، در طول مسیر خود با اتم های دیگر برخورد کرده و یونشی ثانویه اتفاق می افتد. واضح است که تعداد کمی برخورد کافیسیت تا بهمنی از الکترون بوجود آید. با اینکه هر گازی در آشکارساز کار خواهد کرد ولی عملکرد گازهای نادر نسبت به گازهای دیگر خیلی بهتر است. به دو دلیل پایین بودن ولتاژ آستانه در گاز آرگون و همچنین قیمت پایین و ارزان آن این گاز معمولاً به عنوان جزء اصلی استفاده می شود. البته نئون در مورد اول به گاز آرگون بسیار شبیه است ولی قیمت آن به نسبت خیلی بالاتر است. شمارنده های گازی را می توان در هر سه شکل استوانه ای، کروی و صفحه موازی ساخت اما استفاده از هندسه استوانه ای خیلی آسانتر است، زیرا تکثیر بار در یک شمارنده گازی استوانه ای خیلی آسانتر صورت

می‌گیرد. به همین دلیل در شبیه سازی از هندسه استوانه ای استفاده کرده ایم. در این حالت میدان الکتریکی رابطه ای مستقیم با ولتاژ اعمال شده و رابطه ای عکس با شعاع استوانه به صورت $\ln(b/a)$ که در آن b شعاع استوانه و a شعاع آند است، دارد.

روش کار

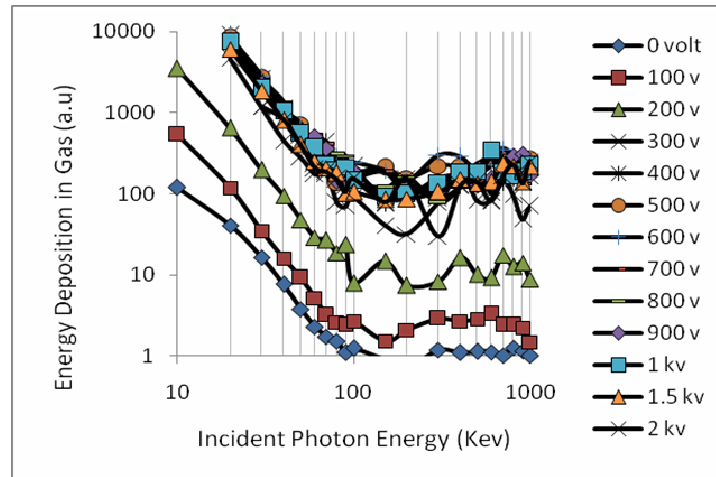
در این شبیه سازی از نسخه Geant4.8.2 استفاده شده است. یکی از چالشهای اصلی در شبیه سازی آشکارسازهای گازی استوانه ای، اعمال میدان الکتریکی شعاعی است. در نسخه مورد استفاده، میدان شعاعی پیشبینی نشده است. به همین دلیل یکی از موفقیت های بدست آمده در این تحقیق، تهیه برنامه C++ مربوط به این میدان شعاعی است. پدیده هائی که برای برهمکنش فوتون و الکترون ها با ماده در این شبیه سازی در نظر گرفته شده است، فوتوالکتریک، پراکندگی کامپتون، پراکندگی راپلی، یونیزاسیون و تابش ترمزی هستند که برای آنها کلاسهای جداگانه ای تعریف شده است. شکل (۱) تولید بهمن در حجم حساس شمارنده را که توسط Geant4 شبیه سازی شده است را نشان میدهد. آشکارساز مورد نظر، استوانه ای از جنس استیل ۲۴۶ تشکیل شده از ۶۷٪ آهن، ۱۲٪ نیکل، ۱۷٪ کرم و با قطر (۱۲/۷ cm) ۱۲۷٪ و ضخامت 0.0001m (۰/۱mm) می باشد. سیم آند دارای قطر 0.0001m (۰/۱mm) و جنس تنگستن است. پنجره ای از جنس مایلار و به ضخامت 0.0001m (۰/۱mm) روی یکی از قاعده های استوانه تعبیه شده است. برای گاز درون آشکارساز، مخلوط ۹۰٪ از گاز آرگون و ۱۰٪ گاز متان (گاز P10) مورد آزمایش قرار گرفته است.



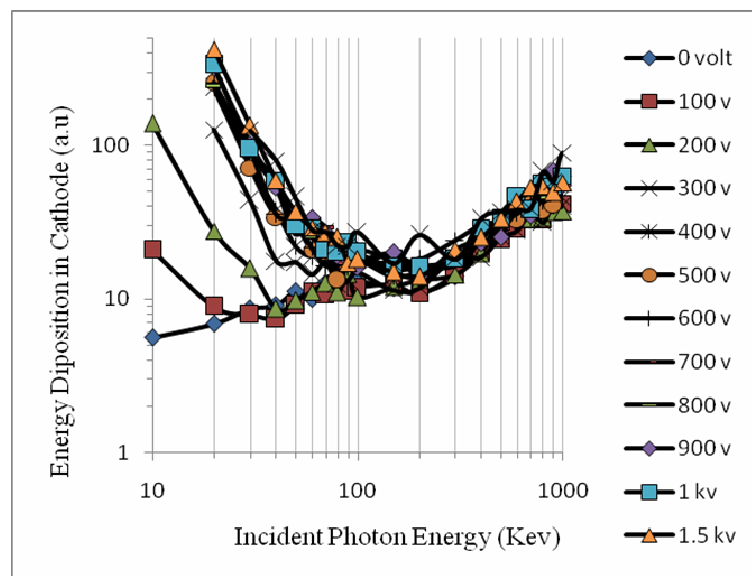
شکل(۱)- یونیزه شدن گاز توسط فوتون و تولید بهمن الکترونی در اطراف سیم آند در یک آشکارساز گازی با هندسه استوانه ای

اشعه فوتونی با توزیع یکنواخت مکانی (البته بطور تصادفی) از تمام سطح پنجره وارد شمارنده می شوند. چشمه تعریف شده برای تولید فوتون، چشمه ای مسطح و تک انرژی است که در فاصله ۱ سانتیمتری از سطح پنجره قرار دارد. تعداد فوتونهای تولید شده در هر اجرای برنامه ۳۷۰۰۰ تا میباشد که آن را میتوان با $1300-10 \mu\text{eV}$ (keV) مقایسه نمود. شبیه سازی با انرژیهای متفاوت و در محدوده Ci چشمه ای با اکتیویته

انجام گرفته شده است. نمودارهای شکل (۲) و شکل (۳) مقدار انرژی تخلیه شده را بر حسب انرژی فوتون ورودی در ولتاژهای متفاوت از ۱۰۰ تا ۲۰۰۰ ولت بترتیب در گاز (P10 با فشار ۱ اتمسفر) و بدنه (کاتد) شمارنده را نشان می‌دهند.



شکل (۲) - نمودار مقدار انرژی تخلیه شده در گاز P10 بر حسب انرژی ذره ورودی برای ولتاژهای متفاوت

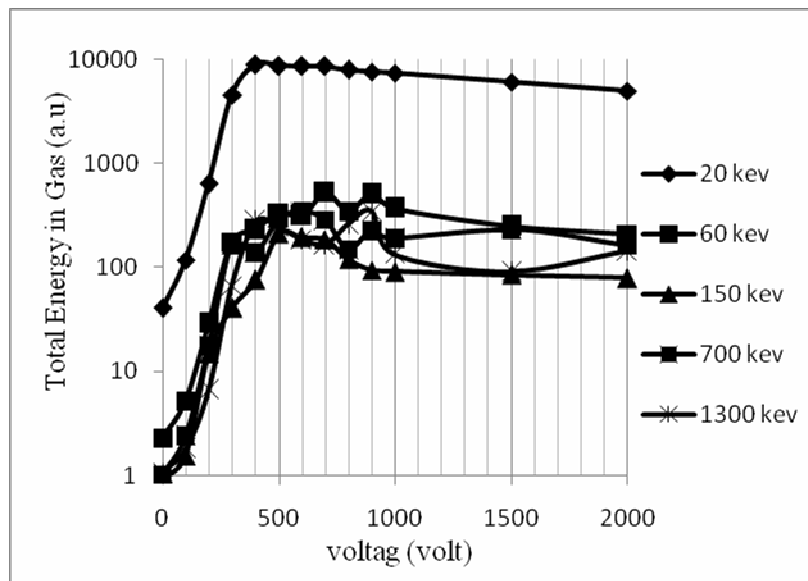


شکل (۳) - نمودار مقدار انرژی تخلیه شده در کاتد بر حسب انرژی ذره ورودی برای ولتاژهای متفاوت

نتایج

همانطور که در نمودار شکل (۲) مشاهده میشود، مقدار انرژی کل آزاد شده در گاز که ناشی از مجموع یونیزاسیون اولیه فوتون و یونیزاسیون های ثانویه است، با افزایش ولتاژ افزایش می یابد. این افزایش در مورد پرتوهای ورودی با انرژی متفاوت اتفاق می افتد ولی همانطور که مشاهده میشود منحنیهای مقدار جذب انرژی از انرژیهای پایین تا انرژیهای حدود 80 keV در ولتاژهای بالای 400 ولت با اختلاف اندکی، تقریباً بر هم منطبق میگردند این انطباق بدلیل پدیده فوتوالکتریک و مقدار مشخص یونیزاسیون ناشی از آن میباشد. در انرژیهای بالاتر بدلیل شروع ناحیه پراکندگی کامپتون و اینکه این برهمکنش در کجای محفظه گازی اتفاق افتاده، مقادیر جذب انرژی دچار افت و خیزهایی خواهد شد که آن نیز در نمودار مشهود میباشد. شکل (۳) نشان دهنده میزان جذب انرژی در بدنه کاتد را نشان میدهد. در حالتی که ولتاژی اعمال نشده است، میزان جذب با افزایش انرژی پرتو ورودی، یک روند یکنواخت افزایشی را نشان میدهد. با افزایش ولتاژ، بخاطر حرکت الکترونها در میدان الکتریکی (فارغ از ایجاد یونیزاسیونهای ثانویه) اتفاقات دیگری که منجر به جذب انرژی در کاتد میشود هم رخ میدهد. یکی از آنها، تحریک تعدادی از اتمهای گاز توسط الکترونها است که منجر به تولید فوتونهای ماوراء بنفش میگردد. اثر دیگر، برخورد الکترونها پر شتاب به سطح آند و رخ دادن پدیده تابش ترمزی و برگشت ایکس تولید شده است. اثر دیگری که در انرژیهای بالاتر وجود دارد همان پدیده کامپتون است که فوتونهای پراکنده ایجاد میکند. جذب هر سه این فوتونها در کاتد باعث تغییرات در منحنی خواهد شد. در این مورد نیز منحنی های مذکور برای انرژی های زیر 80 keV در ولتاژهای 400 تا 1000 ولت تقریباً منطبقند ولی در ولتاژهای بالاتر از آن، بدلیل سرعت خیلی زیاد الکترون، مقدار جذب انرژی در کاتد به همان دلایل ذکر شده در بالا افزایش محسوس تری خواهد یافت. شکل (۴) تغییرات مقدار انرژی جذب شده در گاز $P10$ را برحسب تغییرات ولتاژ اعمالی برای انرژیهای متفاوت پرتوهای فوتونی نشان میدهد. با توجه به این نمودار میتوان نتیجه گرفت که رفتار آشکارساز تعریف شده در این شبیه سازی برای ولتاژهای بالاتر از حدود 400 ولت به حالت پایداری میرسد هر چند که از این ولتاژ به بالا مقدار جذب انرژی به کندی کاهش پیدا میکند.

نتیجه دیگری که از این نمودار میتوان گرفت آنست که برای انرژیهای بالای فوتون ورودی، مقدار جذب انرژی که در نهایت منجر به شمارش میشود با تغییرات ولتاژ، تغییرات محسوسی ندارد. این به آن معناست که شمارنده در انرژیهای بالا حساسیت ثابتی دارد و در نتیجه قابلیت تشخیص انرژیهای متفاوت را نخواهد داشت. برای انرژیهای زیر 60 keV این شمارنده بصورت تناسبی کار میکند و در نتیجه میتواند در اسپکتروسکوپی پرتوهای ایکس کم انرژی کاربرد داشته باشد.



شکل (۴) - نمودار مقدار انرژی تخلیه شده در گاز بر حسب ولتاژ برای انرژی متفاوت فوتونها

بحث و نتیجه گیری

در شبیه سازی انجام گرفته در این تحقیق سعی شده است که مشخصات تعریف شده برای آشکارساز، منطبق بر نمونه های موجود باشد. مشخصات داده شده شبیه شمارنده تناسبی مدل ۴۰۱۲ شرکت LND میباشد با این تفاوت که شمارنده مذکور از نوع گاز جاری است که گاز P10 در آن با فشار زیاد جریان دارد به همین دلیل ولتاژ کار شمارنده در حدود ۱۶۰۰ ولت است. نتایج نشان میدهد که اگر از این نوع شمارنده بصورت گاز محبوس با فشار ۱ اتمسفر استفاده کنیم ولتاژ کار شمارنده بصورت محسوسی کاهش پیدا میکند. نویسندگان در نظر دارند که با تغییر تمامی عوامل دخیل در عملکرد یک شمارنده گازی، برای کاربردهای مختلف پارامترهای آن را مورد بررسی قرار داده و مقادیر بهینه را برای طراحی و ساخت آنها بدست آورند.

منابع

- [۱]- S.Agostinelli, et. al., "Geant4 - a simulation toolkit", Nucl.Instr. and Meth. A506,P250, (2003).
 [۲]- physics refrence manual at the Geant4. Available from: <http://geant4.web.cern.ch/geant4>.
 [۳]- M.M.Nasseri, et al., "Low energy X – ray imaging using plastic scintillating fiber: A simulation study", Nucl. Instr and Meth. B234,Pp362-368, (2005).
 [۴]- G.O.Depaola, "Measuring polarization in the X – ray rang", Nucl.Instr and Meth. A566, Pp590 -597, (2006).

[۵] کنت

کرین، آشنائی با فیزیک هسته ای، مترجم. ابراهیم ابوکاظمی، نشر دانشگاهی، (۱۳۸۴)، ۲۶۶