

شبیه سازی یک آشکارساز آبی تابش چرنکوف با استفاده از کد مونت کارلوی Geant4 برای آشکارسازی میون

سیده زهرا اسلامی راد^{*}، زهرا خلیفه، اعظم ذبیحی
گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه قم، قم، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۷/۲ پذیرش: ۱۴۰۳/۸/۲۶

چکیده

ذرات میون به سبب برهم کنش پرتوهای کیهانی با مولکول‌های موجود در جو تولید می‌شوند و با طول عمر 2.2×10^{-6} s به یک الکترون و دو نوترینو فروپاشی می‌کنند. این الکترون‌ها در محیط آب با سرعتی بیش‌تر از سرعت نور در محیط، حرکت می‌کنند. بنابراین الکترون‌ها، تابشی در محدوده نور آبی و بنفش در محیط گسیل می‌کنند که به تابش چرنکوف معروف است. در این پژوهش با کمک کد شبیه‌سازی Geant4، یک آشکارساز چرنکوف ساده برای مطالعه تابش چرنکوف الکترون‌های ناشی از واپاشی میون، شبیه‌سازی شد. با استفاده از طیف انرژی فوتون‌های نوری، بازده آشکارساز چرنکوف آبی 0.67 ± 0.14 محاسبه شد. همچنین میانگین طول عمر و انرژی بیشینه الکترون‌های تولید شده با فروپاشی میون به ترتیب برابر 2.197 ± 0.14 و $MeV 52.6$ گردید.

کلیدواژگان: میون‌ها، آشکارساز چرنکوف آبی، شبیه‌سازی، Geant4، فوتون‌های نوری، بازده، میانگین طول عمر، طیف انرژی میون

۱. مقدمه

اجرام نجومی مثل ستاره‌ها و ابرنواخترها علاوه بر تابش نور، ذرات باردار پرانرژی نیز گسیل می‌کنند. ذراتی که در اثر برهم‌کنش‌های هسته‌ای درون این اجرام تولید و به فضای کیهان پرتاب می‌شوند، پرتوهای کیهانی^۱ نامیده می‌شوند. در نتیجه برهم‌کنش پرتوهای کیهانی با مولکول‌های جو زمین بهمنی از ذرات ثانویه تولید می‌شود که بهمن گسترده هوایی^۲ نام دارد. با مطالعه ذرات ثانویه در سطح زمین، می‌توان اطلاعاتی از ذره اولیه ایجاد کننده آن‌ها بدست آورد [۶-۱]. هدف از استفاده از آرایه‌های آشکارساز زمینی، بدست آوردن اطلاعات درباره ذره اولیه، یعنی انرژی، نوع و جهت فرود پرتو کیهانی، است. در این تحقیق، هدف، آشکارسازی ذره ثانویه میون با استفاده از آشکارساز چرنکوف و

^{*} سیده زهرا اسلامی راد: szislami@qom.ac.ir

^۱Cosmic Rays

^۲Extensive Air Showers

بدست آوردن اطلاعاتی نظیر عمر متوسط، محاسبه بازده آشکارساز، انرژی بیشینه الکترونها تولید شده با فروپاشی میون و رسم طیف انرژی میون است. از کاربردهای میونهای کیهانی می توان در اکتشاف معادن، تعیین درصد خلوص، پیش بینی فوران آتش فشانها، تعیین محل و حرکت گسلها و در نتیجه پیش بینی زلزله اشاره نمود. میون ذره ای ثانوی و بنیادی، شبیه به الکترون، که بار الکتریکی آن (e) و اسپین آن $1/2$ است. میانگین جرم میون تقریباً 200 برابر جرم الکترون است و هنگام عبور از مواد، یونیزاسیون انجام می دهد. اتلاف انرژی توسط میونهایی که از جو عبور می کنند، متناسب با مقدار ماده ای است که آنها از آن عبور می کنند. بنابراین، میون ها به نسبت حجم ماده ای که از آن عبور می کنند، انرژی از دست می دهند. طیف انرژی میون ها تقریباً در محدوده $10-100$ GeV است [۱۱-۱]. ذرات باردار میون هنگامی که فروپاشی می کنند تولید الکترون می کنند که انرژی جنبشی آن از انرژی آستانه برای گسیل چرنکوف بیش تر است. در نتیجه ذرات میون را می توان با استفاده از تابش چرنکوف آشکارسازی نمود. اساس کار آشکارساز چرنکوف میونی به این صورت است که میونها در هنگام فروپاشی در آشکارساز تولید الکترون می کنند که سرعت این الکترون در محیط آب، بیش تر از سرعت نور در آن است، بنابراین تولید تابش چرنکوف می کند. تعدادی از فوتونهای تولید شده به طور مستقیم و یا پس از چندین برخورد با دیواره ها به لامپ تکثیر کننده نوری موجود در بالای محفظه آب می رسند و این تکثیر کننده پس از تبدیل فوتونها به الکترون و تکثیر تعداد الکترونها، تپ الکتریکی قابل مشاهده ای در خروجی، اسیلوسکوپ، نشان می دهد. همچنین با فرستادن تپ الکتریکی به شمارنده، می توان تعداد فوتونهای رسیده به لامپ تکثیر کننده نوری را شمارش کرد. مطابق با آنچه گفته شد آشکارسازی میون کاربردهای فراوانی در مطالعات کیهانی، زمین شناسی و پدیده های جوی دارد. بنابراین آشکارسازی میون با روشهای مختلف از نظر فیزیک ذرات بسیار حائز اهمیت است و تحقیقات متعددی در زمینه آشکارسازی میونها صورت پذیرفته است [۱-۱۳].

هو و همکاران به منظور محاسبه ی میانگین طول عمر میون و انرژی بیشینه الکترونها تولید شده از فروپاشی میون از آشکارساز سوسوزن پلاستیکی NE102 (قطر 31 سانتی متر و طول 35 سانتی متر) استفاده کردند که سطح آشکارساز با یک لایه بازتابنده ZrO_2 پوشانده شده بود تا از هدر رفتن فوتون جلوگیری کند. همچنین، یک لامپ تکثیر کننده فوتونی (PMT) همراه با یک مدار الکترونیکی هسته ای به یک کریستال سوسوزن کوپل شد تا سیگنالهایی را تولید کند که متناسب با اتلاف انرژی ذرات باردار ذخیره شده در سوسوزن باشد. در این مطالعه بیشینه انرژی الکترون های تولید شده توسط واپاشی میون $52/5$ MeV محاسبه شد و میانگین طول عمر میون $2/098 \pm 0/006$ μs اندازه گیری شد [۱۲]. همچنین میونها با استفاده از شبیه سازی سنتیلاتور^۳ NE235 آشکارسازی گردید که طول عمر در این روش $2/217 \pm 0/021$ μs محاسبه شد [۱۲]. همچنین در این شبیه سازی، انرژی بیشینه الکترونها حاصل از فروپاشی میون $52/82$ MeV محاسبه شد [۱۳].

بررسی رفتار میونها در عبور از ماده دارای اهمیت است. پرتوهای کیهانی علاوه بر میون، شامل الکترون و پوزیترون است و امکان تولید تابش چرنکوف توسط آنها نیز وجود دارد، در نتیجه بررسی رفتار میونها در آزمایشگاه به سادگی

^۳Scintillator

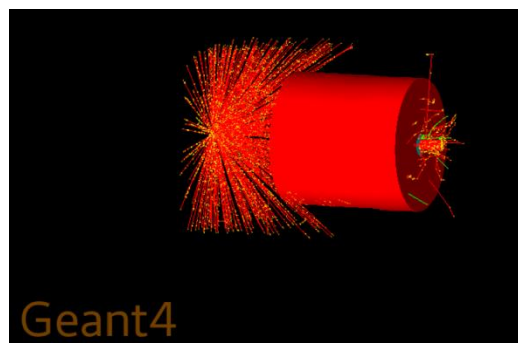
قابل انجام نیست. همچنین ساخت آشکارساز پرهزینه است. بنابراین با شبیه‌سازی می‌توان آشکارساز را طراحی و کارایی آن را بررسی کرد، سپس نسبت به ساخت آن اقدام نمود. شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از بهترین راه‌های طراحی آشکارساز است. در این تحقیق، از کد مونت کارلو Geant4 برای شبیه‌سازی آشکارسازی میون استفاده شد. سپس طیف انرژی میون‌ها، بازده آشکارساز آبی چرنکوف، انرژی بیشینه الکترونهای حاصل از فروپاشی میون و میانگین طول عمر میون محاسبه گردید.

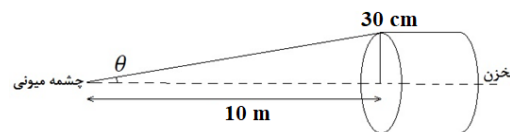
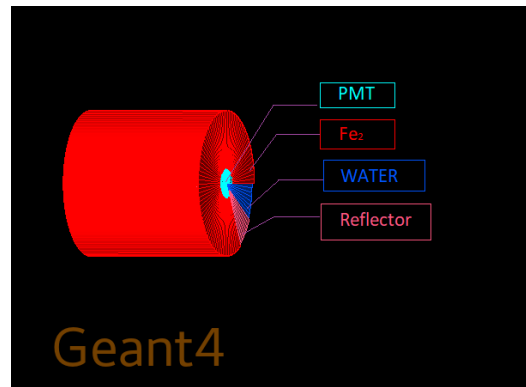
۱. روش انجام کار

نرم افزار Geant4 با قابلیت تراورد ذرات در ماده برای شبیه‌سازی آشکارساز چرنکوف میون مورد استفاده قرار گرفت [۱۴]. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی، در جدول ۱ آمده است.

جدول ۱. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

میون	نوع ذره ورودی
۱۰۰-۱۰ GeV	انرژی ذره
عمود بر سطح مقطع آشکارساز (در جهت مثبت محور Z ها)	جهت میون‌ها نسبت به آشکارساز
شعاع بیرونی ۳۰ cm، ضخامت ۰/۲ cm ارتفاع ۶۰ cm	ابعاد آشکارساز چرنکوف
آهن	جنس دیواره آشکارساز
تیتانیوم دی اکسید	جنس بازتابنده
شعاع ۲ cm و ارتفاع ۰/۳ cm طول موج ۳۰۰-۸۰۰ nm	مشخصات لامپ تکثیر کننده نوری





شکل ۲. هندسه و موقعیت آشکارساز چرنکوف شبیه سازی شده جهت محاسبه ی بازده ی آشکارساز

در بخش Detector نرم افزار Geant4، چیدمانی که برای آزمایش در شبیه سازی اعمال شده به ساده ترین صورت قرار گرفته، به طوریکه فقط قسمت های اصلی و تاثیرگذار آزمایش، شامل هندسه و تعریف مواد در آن وجود دارد این چیدمان شامل ۴ حجم اصلی جهان، آشکارساز و PMT، رفلکتور و آب می باشد. حجم جهان به عنوان حجم مادر برای آشکارساز، مکعبی با ابعاد $400 \times 400 \times 400 \text{ cm}^3$ است که با هوا پر شده است و موقعیت حجم آشکارساز و PMT نسبت به حجم جهان تعریف می شود. مطابق شکل ۱، آشکارساز چرنکوف شامل یک مخزن آهنی با شعاع بیرونی ۳۰ cm، ضخامت ۰/۲ cm و ارتفاع ۶۰ cm می باشد و داخل مخزن از آب پر شده است. چشمه میون در فاصله ۱۰۰۰ cm از آشکارساز چرنکوف قرار گرفت. با توجه به اینکه شار میون ها در سطح زمین $1 \text{ cm}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$ است با ضرب این کمیت در سطح مقطع آشکارساز، تعداد ۲۸۲۶ میون در دقیقه به سطح آشکارساز می رسد. چشمه میون، ذرات را در زاویه های مختلف (۰-۳۶۰) منتشر می کند، پس با توجه به شکل ۱ فقط تابش هایی که در زاویه ی θ قرار دارند به سطح آشکارساز می رسند:

$$\tan \theta = \frac{r}{z_0} \Rightarrow \theta = 1.72^\circ \quad (1)$$

که θ زاویه تابش پرتوهای چشمه با محور r, z شعاع سطح مقطع آشکارساز و z_0 فاصله چشمه تا آشکارساز است. در نتیجه تعداد ذرات چشمه بصورت زیر محاسبه شد:

$$N_\theta = \frac{r_0}{r_\theta} N_1 \Rightarrow N_\theta = 29.674 \quad (2)$$

بنابراین تعداد تابش‌های چشمه در هر دقیقه ۲۹۰۶۷۴ می‌باشد. میون‌ها در هنگام فروپاشی تولید الکترون می‌کنند که منجر به تابش چرنکوف می‌شود. تعداد فوتون‌های چرنکوف بر اساس واحد عمق برهمکنش X ، که توسط ماده با ضریب شکست $n(\lambda)$ در بازه‌ی طول موج $\lambda_1 \leq \lambda \leq \lambda_2$ تابش می‌شود با رابطه زیر داده می‌شود:

$$\frac{dN}{dX} = \pi\alpha \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right) \left(\frac{1}{\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_1}\right) \quad (3)$$

که در آن $\alpha = \left(\frac{e^2}{\hbar c}\right)$ ثابت ساختار ریز است [۱۲]. همچنین β برابر با v/c ، n ضریب شکست محیط و λ_1 و λ_2 محدوده طول موج پرتو چرنکوف می‌باشد. در مرکز سطح بالایی آشکارساز، لامپ تکثیر کننده نوری به شعاع ۲ cm و ارتفاع ۲ cm قرار دارد. طول موج لامپ تکثیر کننده نوری بین ۳۰۰-۶۵۰ nm می‌باشد. یعنی فوتون‌های چرنکوفی که طول موج آن‌ها در این محدوده است و به لامپ تکثیر کننده نوری برسند، شمارش می‌شوند. ممکن است فوتون‌های چرنکوف به وسیله دیواره آشکارساز جذب شوند. در این صورت بخشی از داده‌های آزمایش را از دست می‌دهیم، بنابراین برای بازدهی بهتر، دیواره آشکارساز را با یک بازتابنده^۴ از جنس تیتانیوم دی اکسید^۵ به ضخامت ۰/۱ cm پوشاندیم. قابل ذکر است که در تمام کدهای^۶ شبیه‌سازی، از فهرست فیزیکی FTFP-BERT استفاده شده است. این مرجع فیزیکی، همه‌ی فرآیندهای الکترومغناطیسی را در بر دارد و از اندرکنش‌های هادرون‌ها در انرژی کمتر از ۵ GeV استفاده می‌کند و همچنین برهم‌کنش‌های میون را شامل می‌شود [۱۴، ۱۵].

۲. یافته‌ها و بحث

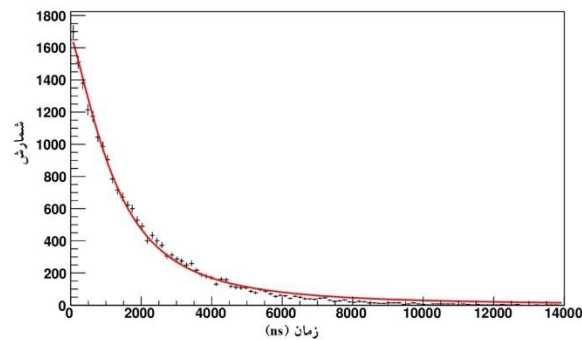
مطابق آنچه در بخش قبل بیان شد، آشکارساز تابش چرنکوف برای آشکارسازی میون‌ها شبیه‌سازی گردید. سپس میانگین طول عمر، کارایی آشکارساز، انرژی بیشینه الکترون‌های حاصل از فروپاشی میون و طیف انرژی الکترون‌های حاصل از فروپاشی محاسبه شد. برای اجرای برنامه، یک چشمه میون شامل ۲۹۰۶۷۴ ذره میون با انرژی ۱۰ GeV- ۱۰۰ را مقابل آشکارساز قرار دادیم. شرایط استفاده شده برای تعیین نقطه ثبت زمان واپاشی به این صورت است که ذره ردیابی شده باید یک میون باشد، طی یک مرحله مشخص واپاشی کند و یک مرحله قبل از آن، در داخل آشکارساز وجود داشته باشد. به این ترتیب فقط طول عمر ذرات واپاشی در داخل آشکارساز ثبت می‌شود، که این محاسبه را

^۴Reflector

^۵TiO₂

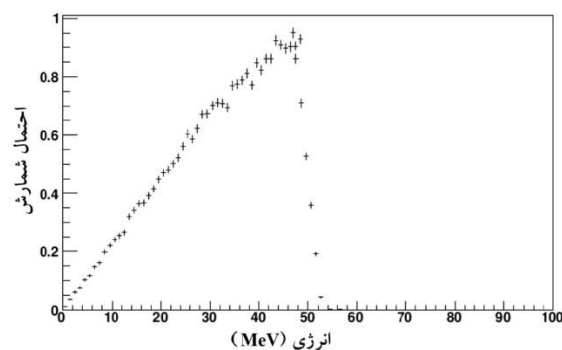
^۶code

واقعی تر می کند. بنابراین میانگین طول عمر τ برای میون های با انرژی ۱۰-۱۰۰ GeV برابر $2/197 \pm 0/014 \mu s$ گردید که در شکل ۲ آمده است.

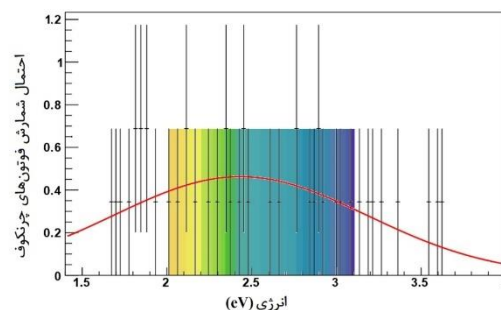


شکل ۲. میانگین طول عمر میون ها با انرژی ۱۰-۱۰۰ GeV

به منظور ترسیم طیف انرژی الکترون های حاصل از فروپاشی میون، انرژی الکترونهای خروجی از PMT که حاصل از فروپاشی میون درون آشکارساز هستند، ثبت گردید. طیف انرژی الکترون های حاصل از فروپاشی میون در شکل ۳ آمده است. انرژی بیشینه ی الکترونها برابر $52/6 \text{ MeV}$ محاسبه گردید. همچنین انرژی متوسط برابر $0/023 \text{ MeV} \pm$ محاسبه شد.



شکل ۳. طیف انرژی الکترونهای حاصل از فروپاشی میون.



شکل ۴. هم پوشانی نمودار انرژی فوتونهای مرئی و نمودار فوتونهای چرنکوف به دست آمده از شبیه سازی- انرژی فوتونهای چرنکوف در محدوده انرژی فوتون آبی و بنفش

شکل ۴ طیف انرژی فوتون‌های چرنکوف به دست آمده را نشان می‌دهد. بازه انرژی فوتون‌های چرنکوف به دست آمده $1/2 - 4\text{FeV}$ است، که همان بازه انرژی پرتوهای مرئی است.

برای محاسبه کارایی آشکارساز چرنکوف میون، چشمه میونی در فاصله ۱۰ متری از آشکارساز قرار گرفت. در این شبیه‌سازی ۲۹۰۶۷۴ پرتو میون به آشکارساز تابیده شد و با توجه به تعداد نوترینو میونی و آنتی نوترینو الکترونی تولید شده، که هر کدام ۱۹۷ عدد می‌باشد، پی به واپاشی ۱۹۷ ذره میون می‌بریم. سپس می‌توان بازدهی آشکارساز چرنکوف میونی را محاسبه نمود:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{کل میونهای واپاشی شده}}{\text{میونهای تابشی}} \times 100 \quad (۴)$$

$$\text{Efficiency} = \frac{197}{290674} \times 100$$

بازدهی این آشکارساز ۰/۰۶۷ محاسبه شد. همچنین ۲۸۵ فوتون چرنکوف به لامپ تکثیر کننده فوتونی رسیده‌اند. فوتون‌های چرنکوف به صورت کروی در تمام جهت‌ها ساطع می‌شوند و ممکن است قسمتی از آن‌ها به لامپ نرسیده، با ماده برهم‌کنش کنند و انرژی خود را از دست دهند. حال به منظور ارزیابی آشکارساز چرنکوف میون شبیه‌سازی شده، نتایج حاصله با مطالعات مشابه مقایسه گردید. نتایج حاصل از شبیه‌سازی با نمونه‌ی واقعی آشکارساز چرنکوف، مقایسه گردید. مطابق با نتایج، کارایی آشکارساز شبیه‌سازی ۰/۰۶۷ و آشکارساز تجربی ۰/۰۷ گردید که درصد میانگین خطای نسبی بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی کمتر از ۴/۲۸٪ محاسبه شد. نتایج نشان دهنده توافقی خوبی بین کارایی سیستم شبیه‌سازی و تجربی است [۱۵].

آشکارساز چرنکوف شبیه سازی شده ما، با آشکارساز چرنکوف پژوهش ارائه شده توسط هو و همکارانش مقایسه گردید. میانگین طول عمر میون و انرژی بیشینه الکترونهای حاصل از واپاشی میون در این مطالعه به ترتیب $0.14 \pm \mu\text{s}$ و 2.197 MeV و 52.6 MeV محاسبه شد. در صورتی که در پژوهش ارائه شده توسط هو و همکاران این مقادیر به ترتیب برابر $0.06 \pm \mu\text{s}$ و 2.098 MeV و 52.5 MeV گردید [۱۲]. میانگین خطای نسبی برای میانگین طول عمر میون و انرژی بیشینه الکترونهای حاصل از واپاشی میون به ترتیب برابر ۴/۷ و ۰/۱۹٪ اندازه گیری شد [۱۲].

همچنین نتایج تحقیقات ما (میانگین طول عمر میون و انرژی بیشینه الکترونهای حاصل از واپاشی میون) با نتایج حاصل از آشکارساز سنتیلاتور NE235 مقایسه گردید که میانگین طول عمر میون و انرژی بیشینه الکترونهای حاصل از واپاشی میون به ترتیب برابر $0.21 \pm \mu\text{s}$ و 2.217 MeV و 52.82 MeV محاسبه شد که دارای میانگین خطای نسبی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۴۱٪ است [۱۳]. میزان خطای نسبی محاسبه شده، نشان دهنده دقت خوب آشکارساز چرنکوف میون شبیه‌سازی شده است.

۳. نتیجه گیری

آشکارسازی میون با روش های مختلف از نظر فیزیک ذرات بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، آشکارسازی ذره ثانویه میون با روش تابش چرنکوف انجام گردید. بدین ترتیب که آشکارساز آبی چرنکوف با کد مونت کارلوی Geant4 شبیه سازی شد. سپس اطلاعاتی نظیر عمر میانگین، بازده آشکارساز، طیف انرژی میون و طیف الکترونیهای حاصل از واپاشی میون بدست آمد و نتایج حاصله با مطالعات مشابه مقایسه گردید. خطای به دست آمده نشان دهنده توافقی خوبی بین داده های تجربی و شبیه سازی است. بنابراین کد شبیه سازی Geant4 و هندسه آشکارساز آبی چرنکوف به خوبی می تواند برای آشکارسازی ذرات میون استفاده شود.

۴. مراجع

1. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, J.M. Albury, I. Allekotte, A. Almela, J. Alvarez-Muñiz, R.A. Batista, G.A. Anastasi, L. Anchordoqui, and B. Andrada, Calibration of the underground muon detector of the Pierre Auger Observatory. *Journal of instrumentation*, 16(04) (2021), P04003.
2. A. Aab, P. Abreu, M. Aglietta, J.M. Albury, I. Allekotte, A. Almela, J.A. Castillo, J. Alvarez-Muñiz, R.A. Batista, G.A. Anastasi, and L. Anchordoqui, Studies on the response of a water-Cherenkov detector of the Pierre Auger Observatory to atmospheric muons using an RPC hodoscope. *Journal of Instrumentation*, 15(09) (2020) P09002.
3. B. S. González, R. Conceição, M. Pimenta, B. Tomé, and A. Guillén, Tackling the muon identification in water Cherenkov detectors problem for the future Southern Wide-field Gamma-ray Observatory by means of machine learning. *Neural Computing and Applications*, 34(7) (2022) 5715-5728.
4. D. Joković, D. Maletić, A. Dragić, N. Veselinović, M. Savić, V. Udovičić, R. Banjanac, and D. Knežević, Application of Geant4 simulation in measurement of cosmic-ray muon flux and studies of muon-induced background. *The European Physical Journal Plus*, 138(11) (2023) 1-9.
5. A.S. Georgadze, and V.A. Kudryavtsev, Geant4 simulation study of low-Z material detection using muon tomography. *Journal of Instrumentation*, 18(12) (2023), C12014.
6. J.M. John, G. Majumder, S.V. Pethuraj, Benchmarking GEANT4 simulation of mini-Iron Calorimeter for cosmic ray muon studies. *arXiv preprint arXiv:2309.00992*, (2023).

7. N. Mori, F. Ambrosino, L. Bonechi, L. Cimmino, R. Dalessandro, P. Noli, G. Saracino, P. Strolin, L. Viliani, A Geant4 framework for generic simulations of atmospheric muon detection experiments, ANNALS OF GEOPHYSICS, 60(1) (2017), 0108.
8. A. Clarkson, D.J. Hamilton, M. Hoek, D.G. Ireland, J.R. Johnstone, R. Kaiser, ... & M. Murray, GEANT4 simulation of a scintillating-fibre tracker for the cosmic-ray muon tomography of legacy nuclear waste containers, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 746 (2014) 64-73.
9. D. Lo Presti, G. Gallo, D.L. Bonanno, D.G. Bongiovanni, F. Longhitano, & S. Reito, Feasibility study of a new Cherenkov detector for improving volcano muography, Sensors, 19(5) (2019) 1183.
10. P. Aguiar, E. Casarejos, J. Silva-Rodríguez, J.A. Vilan, and A. Iglesias, Geant4-GATE Simulation of a Large Plastic Scintillator for Muon Radiography, IEEE Transactions on Nuclear Science, 62(3) (2015)1233-1238.
11. P. Shukla and S. Sundaresh, Energy and angular distributions of atmospheric muons at the Earth, Int. J. Mod. Phys. A, 33, (2018)1850175
12. Y. Hu, T. Wang, Y. Mei, Z. Zhang, C. Ning A simple setup to measure muon lifetime and electron energy spectrum of muon decay and its Monte Carlo simulation, arXiv: 1608.06936 (2016).
13. P.S Canflanca, Monte Carlo Simulation of a Detector for Cosmic Rays, Bachelor Thesis, Kernphysik, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, (2014).
14. G. Collaboration, Geant4 User's Guide for Application Developers, Accessible from the GEANT4 web page [1] Version geant4 9 (2012).
15. L. Lappetito, S.V. A. Moritz, S. bibbi, DIY water Cherenkov detector, Physic open Lab, CherenkovDetector_ENG (2016).

Simulation of a Simple Water Cherenkov Detector Using GEANT4 Monte Carlo Code for Muons Detection

Seyedeh Zahra Islami rad*, Zahra Khalifeh, Azam Zabihi

Department of Physics, Faculty of Science, University of Qom, Qom, Iran

Abstract

Muon particles are produced by the interaction of cosmic rays with molecules in the atmosphere and are decayed to an electron and two neutrinos with a lifetime of $2.2 \mu\text{s}$. These electrons move in the water environment faster than the speed of light in the same environment. Therefore, the electrons emit radiation in the blue and violet light range which is known as Cherenkov radiation. In this research, using the Geant4 simulation code, a simple water Cherenkov detector was simulated to study the Cherenkov radiation of electrons caused by muon decay. Using the energy spectrum of optical photons, the detection efficiency of the water Cherenkov detector was calculated 0.067. Also, the mean lifetime and maximum energy of the electrons produced by the muon decay were measured $2.197 \pm 0.014 \mu\text{s}$ and $E_{\text{max}} = 52.6 \text{ MeV}$, respectively.

Keywords: Muons, Water Cherenkov detector, Simulation, Geant4, Optical photons, Efficiency, Mean lifetime, Energy spectrum of muons.

* Corresponding Author: szislami@qom.ac.ir