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 برهم‌کنش پرتوهای کیهانی با مولکول‌های موجود در جو تولید می‌شوند و با طول عمر ۲٫۲ μs 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 محدودهٔ 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 مطالعهٔ تابش چرنکوف الکترون‌های ناشی از واپاشی میون، شبیه‌سازی شد. با استفاده از طیف انرژی فوتون‌های نوری، بازده آشکارساز چرنکوف آبی ۰٫۰۶۷ محاسبه شد. همچنین میانگین طول عمر و انرژی بیشینه الکترونهای تولید شده با فروپاشی میون به ترتیب برابر ۲٫۱۹۷ ± ۰٫۰۱۴ μs و ۵۲٫۶ MeV 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 نتیجهٔ برهم‌کنش پرتوهای کیهانی با مولکول‌های جو زمین بهمنی از ذرات ثانویه تولید می‌شود که بهمن گسترده هوایی[۲] نام دارد. با مطالعهٔ ذرات ثانویه در سطح زمین، می‌توان اطلاعاتی از ذرهٔ اولیهٔ ایجاد کنندهٔ آن‌ها بدست آورد[۶-۱]. هدف از استفاده از آرایه‌های آشکارساز زمینی، بدست آوردن اطلاعات دربارهٔ ذرهٔ اولیه، یعنی انرژی، نوع و جهت فرود پرتو کیهانی، است. در این تحقیق، هدف، آشکارسازی ذرهٔ ثانویهٔ میون با استفاده از آشکارساز چرنکوف و

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

[۱] Cosmic Rays
[۲] Extensive Air Showers

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

بدست آوردن اطلاعاتی نظیر عمر متوسط، محاسبه بازده آشکارساز، انرژی بیشینه الکترونهای تولید شده با فروپاشی میون و رسم طیف انرژی میون است. از کاربردهای میون‌های کیهانی می‌توان در اکتشاف معادن، تعیین درصد خلوص، پیش‌بینی فوران آتش‌فشان‌ها، تعیین محل و حرکت گسل‌ها و در نتیجه پیش‌بینی زلزله اشاره نمود. میون ذره‌ای ثانوی و بنیادی، شبیه به الکترون، که بار الکتریکی آن (e) و اسپین آن ۱/۲ است. میانگین جرم میون تقریبا ۲۰۰ برابر جرم الکترون است و هنگام عبور از مواد، یونیزاسیون انجام می‌دهد. اتلاف انرژی توسط میون‌هایی که از جو عبور می‌کنند، متناسب با مقدار ماده‌ای است که آنها از آن عبور می‌کنند. 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 محدودهGeV ۱۰-۱۰۰ است [۱-۱۱]. ذرات باردار میون هنگامی که فروپاشی می‌کنند تولید الکترون می‌کنند که انرژی جنبشی آن از انرژی آستانه برای گسیل چرنکوف بیش‌تر است. در نتیجه ذرات میون را می‌توان با استفاده از تابش چرنکوف آشکارسازی نمود. اساس کار آشکارساز چرنکوف میونی بـه این صورت است که میون‌ها در هنگام فروپاشی در آشکارساز تولید الکترون می‌کنند که سرعت این الکترون در محیط آب، بیش‌تر از سرعت نور در آن است، بنابراین تولید تابش چرنکوف می‌کند. تعدادی از فوتون‌های تولید شده به طور مستقیم و یـا پـس از چندین برخورد با دیواره‌ها به لامپ تکثیرکنندهٔ نوری موجود در بالای محفظهٔ آب می‌رسند و این تکثیرکننده پس از تبدیل فوتون‌ها به الکتـرون و تکثیـر تعـداد الکتـرون‌هـا، تـپ الکتریکـی قابـل مشاهده‌ای در خروجی، اسیلوسکوپ، نشان می‌دهد. همچنین با فرستادن تپ الکتریکی به شمارنده، می‌توان تعداد فوتون‌های رسیده به لامپ تکثیرکنندهٔ نوری را شمارش کرد. مطابق با آنچه گفته شد آشکارسازی میون کاربردهای فراوانی در مطالعات کیهانی، زمین شناسی و پدیده‌های 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 الکترونهای تولید شده از فروپاشی میون از آشکارساز سوسوزن پلاستیکیNE102 (قطر ۳۱ سانتی متر و طول ۳۵ 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 هسته‌ای به یک کریستال سوسوزن کوپل شد تا سیگنال‌هایی را تولید کند که متناسب با اتلاف انرژی ذرات باردار ذخیره‌شده در سوسوزن باشد. در این مطالعه بیشینه انرژی الکترون های تولید شده توسط واپاشی میون ۵۲/۵ MeV محاسبه شد و میانگین طول عمر میون ۰/۰۰۶ ± ۲/۰۹۸ µs اندازه گیری شد [۱۲]. همچنین میون‌ها با استفاده از شبیه‌سازی سنتیلاتور[۳] NE235 آشکارسازی گردید که طول عمر در این روش ۰/۰۲۱ ± ۲/۲۱۷ µs محاسبه شد [۱۲]. همچنین در این شبیه سازی، انرژی بیشینه الکترونهای حاصل از فروپاشی میون ۵۲/۸۲ 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

[۳] Scintillator

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

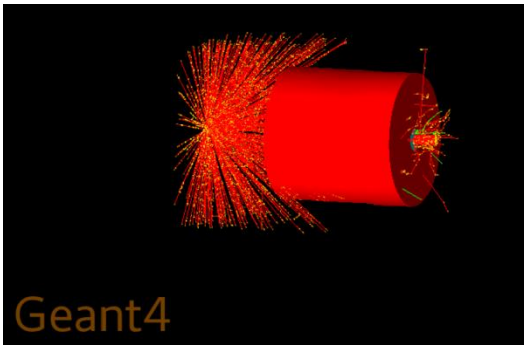
قابل انجام نیست. همچنین ساخت آشکارساز پرهزینه است. بنابراین با شبیه‌سازی می‌توان آشکارساز را طراحی و کارایی آن را بررسی کرد، سپس نسبت به ساخت آن اقدام نمود. شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از بهترین راه‌های طراحی آشکارساز است. در این تحقیق، از کد مونت کارلو Geant4 برای شبیه‌سازی آشکارسازی میون استفاده شد. سپس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

۱. روش انجام کار

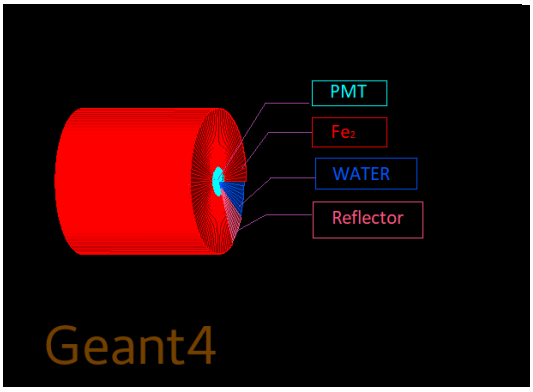
نرم افزار Geant4 با قابلیت ترابرد ذرات در ماده برای شبیه‌سازی آشکارساز چرنکوف میون مورد استفاده قرار گرفت[۱۴]. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی، در جدول ۱ آمده است.

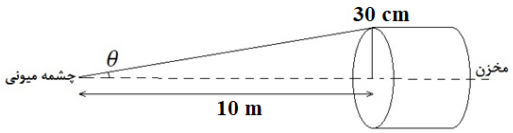
جدول۱. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی

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



[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]





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 cm^3 ۴۰۰ ×۴۰۰ × ۴۰۰ 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 cm ۳۰، ضخامت ۰٫۲cm و ارتفاع ۶۰cm می‌باشد و داخل مخزن از آب پر شده است. چشمهٔ میون در فاصلهٔ cm ۱۰۰۰ از آشکارساز چرنکوف قرار گرفت. با توجه به اینکه شار میون‌ها در سطح زمین $cm^{-۲}.min^{-۱}$ ۱ است با ضرب این کمیت در سطح مقطع آشکارساز، تعداد ۲۸۲۶ میون در دقیقه به سطح آشکارساز می‌رسد. چشمهٔ میون، ذرات را در زاویه‌های مختلف (۳۶۰-۰) منتشر می‌کند، پس با توجه به شکل ۱ فقط تابش‌هایی که در زاویه‌ی ۲θ قرار دارند به سطح آشکارساز می‌رسند:

$$tan\theta = \frac{r}{z_0} \Rightarrow \theta = ۱.۷۲^{\circ} \quad (۱)$$

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

$$N_۲ = \frac{۳۶۰}{۲\theta} N_۱ \Rightarrow N_۲ = ۲۹۰۶۷۴ \quad (۲)$$

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

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 رابطهٔ زیر داده می‌شود:

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

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 محدودهٔ طول موج پرتو چرنکوف می‌باشد. در مرکز سطح بالایی آشکارساز، لامپ تکثیر کننده نوری به شعاع ۲cm و ارتفاع cm ۰/۳ قرار دارد. طول موج لامپ تکثیر کنندهٔ نوری بین ۶۵۰nm–۳۰۰ می‌باشد. یعنی فوتون‌های چرنکوفی که طول موج آن‌ها در این محدوده است و به لامپ تکثیرکنندهٔ نوری برسند، شمارش می‌شوند. ممکن است فوتون‌های چرنکوف به وسیلهٔ دیوارهٔ آشکارساز جذب شوند. در این صورت بخشی از داده‌های آزمایش را از دست می‌دهیم، بنابراین برای بازدهی بهتر، دیوارهٔ آشکارساز را با یک بازتابنده[۴] از جنس تیتانیوم دی اکسید[۵] به ضخامت cm ۰/۱ 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 GeV ۵ 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 چشمهٔ میون شامل ۲۹۰۶۷۴ ذرهٔ میون با انرژی GeV ۱۰-۱۰۰ را مقابل آشکارساز قرار دادیم. شرایط استفاده شده برای تعیین نقطه ثبت زمان واپاشی به این صورت است که ذرهٔ 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

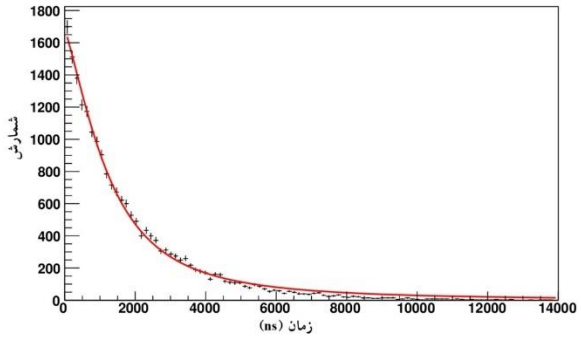
[۴] Reflector

[۵] TiO_2

[۶] code

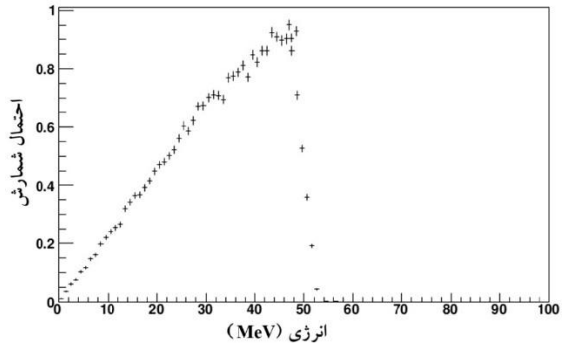
[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

واقعی‌تر می‌کند. بنابراین میانگین طول عمر τ برای میون‌های با انرژی GeV ۱۰-۱۰۰ برابر ۰/۰۱۴μs ± ۲/۱۹۷ گردید که در شکل ۲ آمده است.

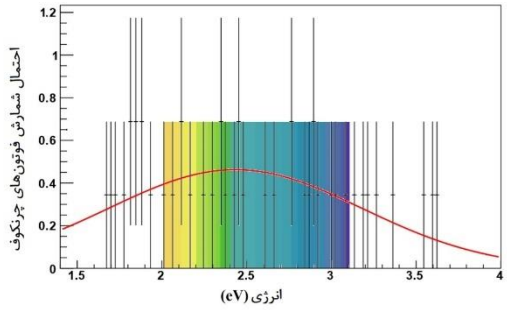


شکل۲. میانگین طول عمر میون‌ها با انرژی ۱۰GeV-۱۰۰

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 ۵۲/۶ MeV محاسبه گردید. همچنین انرژی متوسط برابر ۰/۰۲۳ MeV ± ۳۴/۳۴ محاسبه شد.



شکل۳. طیف انرژی الکترونهای حاصل از فروپاشی میون.



شکل۴. هم پوشانی نمودار انرژی فوتون‌های مرئی و نمودار فوتون‌های چرنکوف به دست آمده از شبیه‌سازی-انرژی فوتون‌های چرنکوف در محدوده انرژی فوتون آبی و بنفش

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

شکل۴ طیف انرژی فوتون‌های چرنکوف به دست آمده را نشان می‌دهد. بازهٔ انرژی فوتون‌های چرنکوف به دست آمده ۱/۲ -۴eV است، که همان بازهٔ انرژی پرتوهای مرئی است.

برای محاسبه کارایی آشکارساز چرنکوف میون، چشمهٔ 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 ذرهٔ میون می بریم. سپس می‌توان بازدهی آشکارساز چرنکوف میونی را محاسبه نمود:

$$\text{Efficiency} = \frac{\text{کل میون‌های واپاشی شده}}{\text{میون‌های تابشی}} \times ۱۰۰ \quad (۴)$$

$$\text{Efficiency} = \frac{۱۹۷}{۲۹۰۶۷۴} \times ۱۰۰$$

بازدهی این آشکارساز ۰/۰۶۷ محاسبه شد. همچنین ۲۸۵ فوتون چرنکوف به لامپ تکثیر کنندهٔ 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 دهندهٔ توافق خوبی بین کارایی سیستم شبیه‌سازی و تجربی است[۱۵].

آشکارساز چرنکوف شبیه سازی شدهٔ 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 ۰/۰۱۴ ± μs ۲/۱۹۷ و ۵۲/۶ MeV محاسبه شد. در صورتی که در پژوهش ارائه شده توسط هو و همکاران این مقادیر به ترتیب برابر ۰/۰۰۶ ± ۲/۰۹۸ μs و ۵۲/۵ 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 سنتیلاتورNE235 مقایسه گردید که میانگین طول عمر میون و انرژی بیشینه الکترونهای حاصل از واپاشی میون به ترتیب برابر ۰/۰۲۱ ± ۲/۲۱۷ μs و۵۲/۸۲ MeV محاسبه شد که دارای میانگین خطای نسبی به ترتیب ۰/۹ و ۰/۴۱ ٪ است [۱۳]. میزان خطای نسبی محاسبه شده، نشان دهندهٔ دقت خوب آشکارساز چرنکوف میون شبیه‌سازی شده است.

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

۳. نتیجه‌گیری

آشکارسازی میون با روش‌های 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 شبیه‌سازی شد. سپس اطلاعاتی نظیر عمر میانگین، بازده آشکارساز، طیف انرژی میون و طیف الکترونهای حاصل از واپاشی میون بدست آمد و نتایج حاصله با مطالعات مشابه مقایسه گردید. خطای به دست آمده نشان دهندهٔ توافق خوبی بین داده‌های تجربی و شبیه‌سازی است. بنابراین کد شبیه سازی Geant4 و هندسه آشکارساز آبی چرنکوف به خوبی می‌تواند برای آشکارسازی ذرات میون استفاده شود.

٤. 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).

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

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 lifetimeand 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).

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]

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 μs. 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±0.014 μs and $E_{max} = 52.6$ MeV, respectively.

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

* Corresponding Author: szislami@qom.ac.ir

[Downloaded from jmrph.khu.ac.ir on 2025-02-19]