



شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تابش میون‌های کیهانی مداخله‌گر در آشکارساز می‌نی‌ایراند

محمدجواد صفری^{۱*}، الهام تقوی^۲، سحر هداوندی^۳، حامد روحی^۴، سروش محتشمی^۱، محمدرضا قربانی^۲، زهرا شهبازی‌راد^۲

۱. دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵۴۴۱۳، تهران- ایران

۲. گروه کاربرد پرتوها، دانشکده مهندسی هسته‌ای، دانشگاه شهید بهشتی، صندوق پستی: ۱۹۸۳۹۶۹۴۱۱، تهران- ایران

۳. گروه فیزیک هسته‌ای، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۱۵۸۷۵۴۴۱۶، تهران- ایران

۴. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فن‌آوری‌های نوین، دانشگاه اصفهان، صندوق پستی: ۸۱۷۴۶۷۳۴۴۱، تهران- ایران

*Email: mjsafari@aut.ac.ir

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۲۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۳/۲۴

چکیده

امروزه آشکارسازی پادنوترینوی رآکتور مورد توجه زیادی است، چون می‌تواند جهت برآورد وضعیت برن‌آپ و ویژگی‌های مصرف سوخت از راه دور استفاده شود. معمولاً اندازه‌گیری نوترینو، براساس واکنش واپاشی بتای معکوس نوترینو با پروتون (اتم هیدروژن) در مواد سوسوزن انجام می‌شود. در این پژوهش، آشکارساز سوسوزن ایراند با طراحی قطعه‌بندی‌شده توسعه یافته و نمونه‌ی مقیاس‌شده‌ی آن با عنوان می‌نی‌ایراند ساخته شده است. اندازه‌گیری نوترینو با چالش‌هایی مواجه است؛ از جمله این‌که عوامل مداخله‌گر در اندازه‌گیری نوترینو باید به خوبی شناسایی و از سیگنال‌های اصلی جدا شوند که میون‌های کیهانی از جمله مهم‌ترین آن‌ها به شمار می‌روند. این امر ایجاب می‌کند که شناخت دقیقی از پاسخ آشکارساز به میون‌های کیهانی حاصل شود. در این پژوهش با استفاده از ابزار جینت ۴ و شبیه‌سازی مونت کارلو، رفتار میون در آشکارساز می‌نی‌ایراند از جنبه‌های مختلف بررسی شده است. با اندازه‌گیری تجربی به مدت ۲۱ روز، رویدادهای مربوط به میون شناسایی شده و ویژگی‌های آن‌ها تعیین می‌شوند. اجرای آزمایش با توسعه‌ی یک سیستم داده‌برداری دیجیتال مخصوص و توسعه‌ی الگوریتم‌های پردازشی مناسب صورت گرفته است. نتایج حاصل، برآوردی از طیف رویدادهای آبی (طیف میشل) و تأخیری (طیف لاندائو) را به دست می‌دهد. مطابقت نتایج تجربی و شبیه‌سازی، نشانگر صحت روند طی شده در بخش‌های شبیه‌سازی و تجربی است.

کلیدواژه‌ها: آشکارساز پادنوترینو، میون‌های کیهانی، طیف میشل، توزیع لاندائو، آشکارساز می‌نی‌ایراند

Simulation and measurement of interfering cosmic muons in Mini-IRAND

M.J. Safari^{1*}, E. Taghavi², S. Hadavandi³, H. Rouhi⁴, S. Mohtashami¹, M.R. Ghorbani², Z. Shahbazi Rad²

1. Faculty of Energy and Physics Engineering, Amirkabir University of Technology, P.O.Box: 158754413, Tehran- Iran

2. Department of Radiation Applications, Faculty of Nuclear Engineering, Shahid Beheshti University, P.O.Box:1983969411, Tehran-Iran

3. Department of Nuclear Physics, Faculty of Physics, Khwaja Nasiruddin Tusi University of Technology, P.O.Box: 158754416, Tehran – Iran

4. Department of Nuclear Engineering, Faculty of Modern Sciences and Technologies, Isfahan University, P.O.Box: 8174673441, Tehran - Iran

Research Article

Received 10.2.2022, Accepted 14.6.2022

Abstract

Reactor antineutrino detection is of interest today because it can estimate burnup status and fuel consumption characteristics remotely. Neutrino measurements are usually based on the inverse beta decay reaction of neutrinos with protons (hydrogen atoms) in scintillation materials. In this context, the IRAND scintillator detector has been developed with a segmented design and a scaled sample of it has been developed, which is referred to as a mini-IRAND. Neutrino measurements face challenges; In particular, interfering factors in neutrino measurements need to be well identified and separated from the main signals, of which cosmic muons are one of the most important. This requires an accurate understanding of the detector's response to cosmic muons. In this study, the Geant 4 tool was used to study the muon behavior in the mini-IRAND detector. Also, cosmic muons were measured for 21 days by the mini-IRAND detector and their characteristics were determined. The experiments were carried out with the development of a special digital data collection system and the development of processing algorithms. The results provide estimates of the instantaneous events (Michel spectrum) and the delay events (Landau spectrum). Consistency of results shows the accuracy of the process.

Keywords: Antineutrino detection, Cosmic muon, Michel spectrum, Landau distribution, Mini-IRAND detector



۱. مقدمه

یکی از ذرات بنیادی بسیار نفوذپذیر پادنوترینو نامیده شده است. پادنوترینو توسط چشمه‌های مختلفی تولید می‌شود که عبارتند از: پادنوترینوی خورشیدی، پادنوترینوی اتمسفری، پادنوترینوی زمینی، پادنوترینوی ابرنواختری و پادنوترینوهای رآکتوری. از آنجایی که واکنش شکافت و مخصوصاً واپاشی محصولات شکافت، مقدار قابل توجهی پادنوترینوی الکترون گسیل می‌کند، اندازه‌گیری نوترینوی رآکتورهای هسته‌ای می‌تواند برای برآورد وضعیت برن‌آپ و ویژگی‌های مصرف سوخت مورد توجه قرار گیرد. به‌همین دلیل از میان انواع پادنوترینوها، پادنوترینوی رآکتوری توجه زیادی را به‌خود جلب کرده است. هدف از اندازه‌گیری پادنوترینو، ردیابی محتوای شکافتی سوخت رآکتورهای در حال کار است [۱]. برن‌آپ سوخت رآکتور هسته‌ای در یک دوره بسیار طولانی مثلاً در حد هفته یا ماه اتفاق می‌افتد [۲]. تخمین محتوای ایزوتوپی قلب رآکتور با اندازه‌گیری‌های طیفی میزان پادنوترینو قابل انجام است و پادنوترینو می‌تواند موجودی پلوتونیم رآکتور را به نحو مناسبی تخمین بزند [۳]. بنابراین، قابلیت آشکارسازی برخط موجودی پلوتونیم موجود در رآکتورهای هسته‌ای از جنبه‌ی ایمنی دارای اهمیت بسیاری است [۴]، که این کار را می‌توان با استفاده از روش آشکارسازی پادنوترینو انجام داد. مزیت مهم استفاده از روش اندازه‌گیری پادنوترینوی رآکتور برای مطالعات در زمینه‌ی برن‌آپ سوخت و توان رآکتور این است که این روش اندازه‌گیری می‌تواند در خارج از محفظه‌ی رآکتور و حتی بیرون از نیروگاه توان هسته‌ای انجام شود.

امروزه پروژه‌های متعددی در دنیا در زمینه‌ی اندازه‌گیری خواص پادنوترینوی رآکتور فعالیت می‌کنند که از جمله مهم‌ترین آن‌ها می‌توان پاندا^۱ [۵، ۶]، کورمراد^۲ [۷، ۸]، پرسپکت^۳ [۹-۱۱]، نولت^۴ [۱۲]، دنس^۵ [۱۳، ۱۴]، مینی تایم کیوب^۶ [۱۵]، و آی‌اس‌ام‌رن^۷ [۱۶] را نام برد. در همین راستا در ایران نیز جهت آشکارسازی پادنوترینوی رآکتورهای هسته‌ای در پروژه‌ای با نام می‌نی‌ایراند^۸، فخری‌زاده و همکاران [۱۷-۱۹] ابتدا یک سلول آشکارسازی را که برای آشکارسازی پادنوترینوی رآکتوری بهینه شده و سپس آرایه‌ای از سلول‌های آشکارسازی را با هدف آشکارسازی پادنوترینوی رآکتوری طراحی کردند. در طراحی این آرایه‌ی آشکارسازی از

آشکارسازهای طراحی‌شده در پروژه‌های پاندا و کورمراد الگوبرداری شده است. در این پژوهش آشکارساز می‌نی‌ایراند بر مبنای طراحی‌های انجام گرفته ساخته شد. با توجه به این‌که در این‌گونه اندازه‌گیری‌ها، تابش میون‌های کیهانی در آشکارساز، پاسخ‌های مشابه با پاسخ آشکارساز به پادنوترینوهای رآکتوری ایجاد می‌کنند، لازم است قبل از اندازه‌گیری پادنوترینوهای رآکتوری، ابتدا میون‌های کیهانی توسط این آشکارسازها اندازه‌گیری شده و رفتار آن‌ها در آشکارساز تعیین شود. پژوهش‌های متعددی در دنیا در زمینه‌ی اندازه‌گیری میون‌های کیهانی انجام شده است. به‌عنوان مثال سانچز^۹ و همکارانش [۲۰] در پروژه‌ی اسکراموجو^{۱۰} و چیاپس^{۱۱}، طول عمر میون را با استفاده از سوسوزن^{۱۲} جی-۲۰۰ اندازه‌گیری کردند. گروه کسینوس-۱۰۰ [۲۱]، با استفاده از پنل‌های سوسوزن در لایه‌های بیرونی آشکارساز کسینوس-۱۰۰، میون را اندازه‌گیری کرده و طیف لاندائو میون اندازه‌گیری شده را تعیین کردند. یوشی^{۱۳} و همکارانش [۲۲] طیف انرژی الکترون ناشی از واپاشی میون و طول عمر میون را با استفاده از سوسوزن پلاستیک این‌ئی-۱۰۲ اندازه‌گیری کردند. طول عمر میون با استفاده از این روش $2.098 \mu\text{s}$ به‌دست آمد. هم‌چنین کوئن^{۱۴} و همکارانش [۲۳] با استفاده از یک سوسوزن پلاستیک طول عمر متوسط میون‌های کیهانی را تعیین کردند.

در این تحقیق با توجه به مداخله‌گری میون‌های کیهانی بر روی آشکارسازی پادنوترینوی رآکتوری، بر آن شدیم تا ابتدا رفتار آشکارساز می‌نی‌ایراند در مقابل ذرات میون کیهانی را تعیین کنیم. به همین جهت در ابتدا، با در نظر گرفتن این‌که شبیه‌سازی به عنوان ابزاری کارآمد و مطمئن در کنار آزمایش‌های تجربی، نقش مهمی را در طراحی آزمایش، ارزیابی عوامل مؤثر بر آزمایش و توسعه و بهینه‌سازی آزمایش ایفا می‌کند، با تکیه بر شبیه‌سازی مونت کارلو، توزیع زمانی واپاشی میون، طول عمر میون، توزیع انرژی به‌جای مانده‌ی میون‌ها، و طیف انرژی الکترون ناشی از واپاشی میون به‌دست آمد. هم‌چنین با اندازه‌گیری تجربی، به مدت ۲۱ روز با استفاده از آشکارساز می‌نی‌ایراند، رویدادهای مربوط به میون شناسایی شده و ویژگی‌های آن‌ها تعیین شد. برای انجام اندازه‌گیری میون‌های کیهانی یک سیستم داده‌برداری دیجیتالی توسعه داده شده و برای ثبت داده‌های آشکارسازی مورد استفاده قرار گرفت. الگوریتم‌های پردازشی لازم برای پردازش غیربرخط (آفلاین)

1. PANDA
2. CORMORAD
3. PROSPECT
4. NuLat
5. DANSS
6. Mini Time Cube
7. ISMRAN (Indian Scintillator Matrix for Reactor Antineutrinos)
8. IRAND (Iranian Reactor Antineutrino Detector)

9. Sanchez
10. Escaramujo
11. Chiapas
12. Yushi
13. Coan

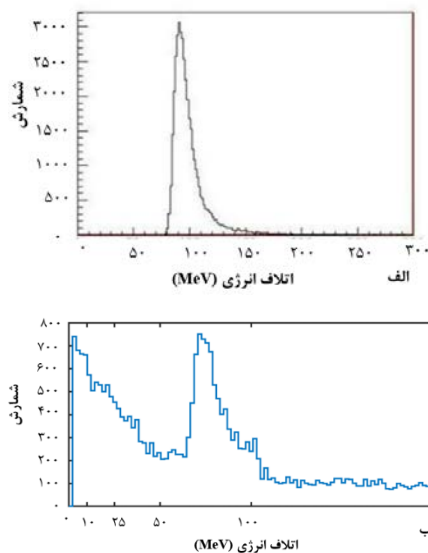




که در این رابطه ν_μ نوترینوی میون و $\bar{\nu}_e$ نوترینوی الکترون است. پرتوهای میون کیهانی زمانی که وارد آشکارساز می‌شوند، اندرکنش یونیزاسیون انجام داده و متوقف شده و واپاشی می‌کنند. در هنگام واپاشی بسته به نوع میون منفی/مثبت، الکترون/پوزیترون تولید می‌شود. تپ‌های الکتریکی ناشی از برجای‌گذاری انرژی میون و انرژی الکترون/پوزیترون دارای رفتاری مشابه دو تپ الکتریکی تولید شده در آشکارسازی پادنوترینو می‌باشد. بنابراین باید تا حد امکان تپ‌های الکتریکی ناشی از این دو نوع تابش از یکدیگر تمیز داده شوند.

۱.۱.۲ توزیع لاندائو^۲

برای یک لایه‌ی نازک از ماده جاذب توزیع اتلاف انرژی میون با عنوان توزیع لاندائو شناخته می‌شود. شکل ۱ الف توزیع اتلاف انرژی میون برای آشکارسازی با ضخامت ۴۱ سانتی‌متر است [۲۶]. مشاهده‌ی این توزیع یکی از مشخصات میون است. اندازه‌گیری انرژی به جا مانده‌ی میون‌های عبوری در سوسوزن شاهد طیفی با قله‌ی معادل با متوسط انرژی ۲ MeV/cm هستیم [۲۷]. بنابراین در این پژوهش با توجه به این‌که طی تابش عمودی میون به آشکارساز، ضخامت ۳۶ سانتی‌متر سوسوزن در مقابل آن است، طیف مشخصه لاندائو دارای قله‌ی در انرژی ۷۲ MeV خواهد بود (شکل ۱ ب).



شکل ۱. الف) توزیع اتلاف انرژی که به ازای ۵۰۰،۰۰۰ میون در آشکارساز با ضخامت ۴۱ سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است (طیف لاندائو) [۲۶] ب) طیف لاندائو پژوهش حاضر با ضخامت آشکارساز ۳۶ سانتی‌متر.

داده‌های دیجیتال حاصل از این آشکارساز توسعه داده شده و برای تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده مورد استفاده قرار گرفت.

۲. مواد و روش‌ها

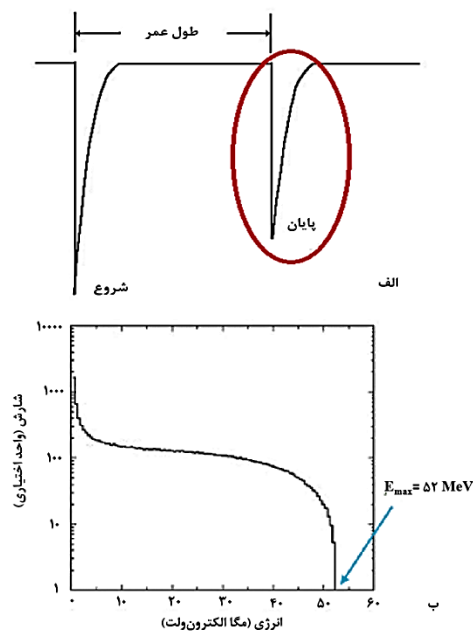
۱۰.۲ مبنای آشکارسازی پادنوترینو و میون

گستره‌ی انرژی پادنوترینوهای تولید شده در رآکتورهای هسته‌ای در محدوده‌ی ۱-۱۰۰۰ مگا الکترون ولت هستند. در آشکارسازهای سوسوزن، پادنوترینو با پروتون‌های موجود در سوسوزن طی واکنش بتای معکوس (¹IBD) [۲۴] اندرکنش انجام می‌دهند که این واکنش مطابق رابطه‌ی ۱ می‌باشد.

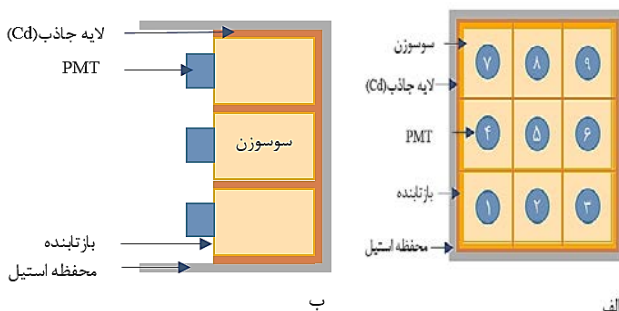


آستانه‌ی انرژی مورد نیاز برای انجام اندرکنش ۱٫۸ مگا الکترون ولت می‌باشد. در این واکنش یک پوزیترون و یک نوترون تولید می‌شود. پوزیترون پس از جفت شدن با الکترون‌های محیط نابود شده و حداقل دو پرتو گاما که هر کدام دارای انرژی ۵۱۱ کیلو الکترون ولت هستند، گسیل می‌شوند. حاصل‌جای‌گذاری این انرژی در داخل ماده‌ی سوسوزن یک نور مریی است. نوترون با پروتون موجود در ماده سوسوزن در زمانی حدود ۱۵۰ میکروثانیه اندرکنش انجام داده و آبشاری از تابش گاما تولید می‌شود. گاماها تولید شده طی اندرکنش کامپتون تولید نور کرده که منجر به تولید تپ الکتریکی می‌شود. با توجه به این‌که میون‌های کیهانی همواره در طبیعت وجود دارند و با سطح آشکارساز نیز برخورد می‌کنند، مشاهده شده است که این میون‌های کیهانی رفتاری مشابه رفتار پادنوترینوی تولید شده توسط رآکتورهای هسته‌ای در داخل آشکارساز دارند [۶]. در همین راستا لازم است که ابتدا رفتار میون‌های کیهانی توسط این آشکارساز شناخته شود تا بتوان تپ الکتریکی میون‌های کیهانی را از تپ الکتریکی تولید شده توسط پادنوترینو در رآکتورهای هسته‌ای تمیز داد. میون‌ها از جمله ذرات بنیادی هستند که از خانواده‌ی فرمیون‌ها و گروه لپتون‌ها بوده و دارای اسپین ۱/۲ می‌باشند. این ذرات مشابه الکترون هستند با این تفاوت که ۲۰۷ مرتبه نسبت به الکترون‌ها سنگین‌تر هستند. میون‌ها معمولاً ناپایدار بوده و دارای طول‌عمر متوسط ۲٫۲ میکروثانیه هستند و از طریق نیروهای ضعیف به یک الکترون و دو نوع نوترینو واپاشی می‌کنند. انتظار می‌رود با رسم نمودار زمانی واپاشی در صورت شناسایی صحیح میون‌ها، به این مقدار طول‌عمر میون دست یابیم [۲۵]. مدهای واپاشی میون مطابق رابطه ۲ می‌باشد.





شکل ۲. الف) تپ الکتریکی مربوط به الکترون حاصل از واپاشی میون، ب) طیف میشل الکترون حاصل از واپاشی میون [۲۹].



شکل ۳. طرح‌واره‌ی آرایه‌ی آشکارساز می‌نی‌ایراند با ابعاد سه در سه، الف) نمای جلو، ب) نمای جانبی.

۳.۲ شبیه‌سازی آشکارسازی میون با استفاده از آرایه‌ی آشکارسازی می‌نی‌ایراند

کدهای شبیه‌سازی طراحی شده به منظور ترابرد میون را می‌توان در دو گروه چندمنظوره مانند جینت ۴، فلوکا و ایم‌سی‌ان‌پی و اختصاصی مانند پرومیو^۶، میوسیک^۷ و میو‌ام^۸ و ایم‌سی^۹ طبقه‌بندی کرد [۳۰]. از این میان، به دلیل قابلیت‌های خاص ابزار جینت ۴، در این پژوهش شبیه‌سازی‌ها توسط این ابزار انجام شد. جینت ۴ گستره‌ای از انواع مدل‌های فیزیکی مختلف ارائه می‌کند و کاربر باید با توجه به ذره‌ی مورد نظر خود، فیزیک لیست مناسب را به دقت انتخاب کند [۳۱].

۲.۱.۲ طیف میشل^۱

طیف انرژی الکترون حاصل از واپاشی میون تحت عنوان "طیف میشل" شناخته می‌شود. در واقع مشخصه‌ی دیگری از میون، که در اثر واپاشی میون به الکترون (پوزیترون) مشاهده می‌شود [۲۸]، طیف میشل است که نشان‌دهنده‌ی وابستگی تعداد الکترون (پوزیترون) به انرژی الکترون ناشی از واپاشی میون است (رابطه‌ی ۳). طیف الکترون‌های حاصل دارای بیشینه مقداری است که نزدیک به نصف جرم سکون میون یعنی ۵۲ مگا الکترون ولت می‌باشد.

$$P(E_e) = C (m_\mu c^2 E_e)^2 (3 - 4 \frac{E_e}{m_\mu c^2}) \quad (3)$$

در این رابطه m_μ جرم میون، E_e انرژی الکترون و c سرعت نور و C یک عدد ثابت می‌باشند.

در آشکارسازی میون، یک راه شناسایی برای اطمینان از این‌که طیف زمانی به دست آمده (مطابق شکل ۲) مربوط به میون است، رسم طیف میشل آن است.

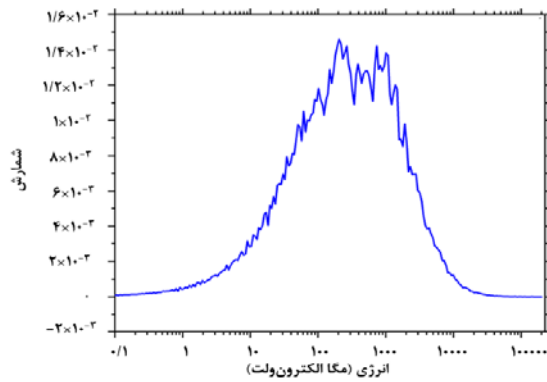
۲.۲ معرفی آشکارساز پادنوترینوی می‌نی‌ایراند

آشکارساز می‌نی‌ایراند یک آرایه‌ی آشکارسازی از نوع سوسوزن پلاستیک با ابعاد سه در سه می‌باشد. این آشکارساز متشکل از نه آشکارساز سوسوزن ان‌ئی-۲۱۰ با ابعاد ۱۲×۱۲×۱۵ سانتی‌متر مکعب می‌باشد. طرح‌واره این آشکارساز از نمای جلو و نمای جانبی در شکل ۳ نمایش داده شده است. به‌منظور افزایش بازدهی سوسوزن‌های پلاستیک، هر یک از سوسوزن‌ها با استفاده از رنگ بازتابنده با نام تجاری ئی‌جی-۳۵۱۰ که برپایه‌ی دی‌اکسید تیتانیوم می‌باشد رنگ‌آمیزی شده‌اند. در این آزمایش تعداد نه لامپ تکثیرکننده‌ی فوتونی دو اینچ، ساخت شرکت هاماماتسو^۴ مدل آر-۷۷۲۳، استفاده شده است که به وجه مربعی هر یک از آشکارسازهای سوسوزن متصل شده‌اند. این لامپ‌های تکثیرکننده‌ی فوتونی توسط ولتاژ منفی با متوسط ولتاژ ۱۴ کیلوولت تغذیه شده‌اند. از ورقه‌های کادمیوم به ضخامت ۱ میلی‌متر جهت تولید گامای تأخیری حاصل از گیراندازی نوترون تولیدی ناشی از اندرکنش پادنوترینو در آشکارساز استفاده می‌شود. مجموعه‌ی آشکارسازها و لامپ‌های تکثیرکننده‌ی فوتون در داخل محفظه استیل با ابعاد ۳۸/۶×۳۸/۶×۲۳/۰ سانتی‌متر مکعب قرار داده شده‌اند.

1. Michel Spectrum
2. NE-102
3. EJ-510
4. Hamamatsu
5. R7723

6. PROPMU
7. MUSIC
8. MUM
9. MMC





شکل ۴. طیف میون عبوری از سقف و رسیده به آشکارساز.

با توجه به این‌که طی واپاشی میون، انرژی و تکانه پایسته است و جرم الکترون و پادنوترینو قابل‌صرف‌نظر کردن است، (رابطه ۴)، بیش‌ترین انرژی الکترون (پوزیترون) حاصل برابر با 52.8 MeV خواهد بود.

$$m_{\mu} = p_{\nu_e} + p_{\nu_{\mu}} + E_e = 2E_e \quad (4)$$

به منظور استخراج طیف‌های مشخصه‌ی تابش میون، با بخش‌بندی کردن زمان و استخراج نورهای جذب شده طی بازه‌های زمانی تعیین شده در جینت ۴، هر رویداد میون به دو بخش شروع (به عنوان بخش طیف لاندائو، ۱۰۰ نانوثانیه اول) و یک بخش پایان (به عنوان بخش طیف میشل، از ۱۰۰ نانوثانیه تا ۱۵ میکروثانیه) تقسیم شد. با توجه به این‌که ترتیب روشن شدن سلول‌ها برای تعیین زمان واپاشی مورد نیاز است، با استفاده از روش داده‌برداری با Hit و SD و اضافه کردن هودوسکوپ‌هایی^۱ در اطراف آشکارساز می‌نی‌ایراند، زمان اولین برخورد ذره به هر سلول تعیین شد [۳۴]. بدین صورت علاوه بر زمان برخورد، اطلاعاتی مانند انرژی ذره فرودی و مکان برخورد نیز به‌دست آمد.

۴.۲ اندازه‌گیری تابش‌های میون کیهانی با استفاده از آرایه آشکارسازی می‌نی‌ایراند

در این پژوهش، بعد از کالیبراسیون سلول‌های سوسوزنی، آرایه‌ی آشکارسازی می‌نی‌ایراند به مدت ۲۱ روز تحت تابش پرتوهای کیهانی قرار گرفت و داده‌های خروجی از آشکارساز با

جینت ۴ برای شبیه‌سازی اندرکنش‌های میون، چهار فرایند فیزیکی یونیزاسیون، تابش ترمزی، تولید زوج و اندرکنش هسته‌ای میون را به همراه واپاشی میون در نظر می‌گیرد. بدیهی است سطح مقطع این اندرکنش‌ها با توجه به انرژی میون فرودی و ماده هدف متغیر خواهد بود، اما سهم اندرکنش یونیزاسیون میون در انرژی‌های پایین (کم‌تر از ۱۰۰ گیگا الکترون‌ولت) میون غالب بوده و واپاشی نیز به عنوان اندرکنش مشخصه‌ی میون شناخته می‌شود [۳۲]. همان‌گونه که ذکر شد، تب‌های الکتریکی ناشی از میون به‌عنوان مداخله‌گر در پاسخ آشکارسازی پادنوترینوهای رآکتوری عمل می‌کند. بنابراین به منظور جداسازی پاسخ‌های میون، لازم است ابتدا عملکرد آشکارساز به این ذره به‌طور کامل شناسایی شود. یکی از راه‌های شناسایی، انجام شبیه‌سازی بوده و از آن‌جا که جینت ۴ با قابلیت ترابرد دقیق نور و فرایندهای فیزیکی میون یک ابزار مناسب به شمار می‌رود، در این کار نیز از این ابزار با نسخه ۱۰.۵ استفاده شده است.

۱.۳.۲ فیزیک شبیه‌سازی

به منظور ترابرد میون و ذرات ثانویه‌ی آن و هم‌چنین ترابرد نوترون‌هایی با انرژی کم‌تر از ۲۰ مگا الکترون‌ولت، از فیزیک QGSP_BIC_HP استفاده شد [۱۶]. علاوه بر این، برای ترابرد نور حاصل از سوسوزنی، فیزیک نوری در جینت ۴ نیز فعال شد. با در نظر گرفتن ضخامت ۰.۵ متر بتون به عنوان سقف آزمایشگاه، طیف میون‌های کیهانی به‌دست آمد. این طیف به عنوان چشمه‌ی میون با زاویه‌ی عمود بر کل محفظه آشکارساز فرود می‌آید (شکل ۴). آن‌چه در خروجی شبیه‌سازی در لامپ تکثیرکننده‌ی فوتونی ثبت می‌شود، تعداد فوتون‌های نوری است که در آشکارساز بر اثر جذب میون تولید شده است، بنابراین لازم است با انجام کالیبراسیون سلول‌های آشکارساز، پاسخ معادل با انرژی هر کدام را نیز ثبت کرد. برای کالیبراسیون سلول‌های سوسوزنی مشابه با اندازه‌گیری تجربی، از سه چشمه رادیوایزوتوپی کبالت-۶۰، سزیم-۱۳۷ و چشمه‌ی تالیوم-۲۰۸، که هر کدام در مرکز وجه مربعی سلول‌ها قرار می‌گیرند، استفاده شده است و معادلات کالیبراسیون هر ۹ سلول به دست آمده است. کالیبراسیون سلول‌های آشکارساز با روش آرایه شده در مرجع [۳۳] انجام شده است.

هودوسکوپ‌ها لایه‌های بسیار نازکی از جنس خلأ می‌باشند و به عبور میون‌ها ۱۰ حساس‌اند و در صورت برخورد میون به آن‌ها، زمان برخورد را در خروجی می‌توان مشاهده کرد.



بنابراین توسط مد داده برداری پی ایچ ای، به طور همزمان ارتفاع سیگنال آشکارساز و زمان رسیدن آن به دیجیتالیزر اندازه گیری و ذخیره می گردد. همان گونه که بیان شد، به منظور برقراری ارتباط با دیجیتالیزر و تنظیم پارامترهای فیلترهای دیجیتال بایستی از توابع تعریف شده در کتابخانه های کائن بهره گرفت. برای این منظور و در این پژوهش، یک برنامه ی گرافیکی به فرم ویندوز و به زبان ++C توسعه داده شد. برنامه ی نوشته شده قابلیت تنظیم مؤلفه های اصلی فیلترهای دیجیتال، نمایش طیف انرژی هر کانال به صورت برخط، ذخیره ی تمامی رویدادها به فرمت مشخص برای پردازش داده، تعیین مدت زمان داده برداری و اعمال فیلترهای متنوع برای پذیرش و یا رد رویدادها را فراهم می نماید. داده های ذخیره شده توسط نرم افزار برای تحلیل و بررسی اطلاعات رویدادهای ثبت شده در آشکارسازها در طول زمان داده برداری مورد پردازش قرار می گیرند. برای اطمینان از صحت و دقت نرم افزار توسعه داده شده، طیف انرژی حاصل از آشکارسازهای مختلف نظیر یدور سدیم، سوسوزن پلاستیک و مایع و آشکارسازهای سطحی حساس^۷ برای انواع پرتوهای گاما، نوترون و بتا اندازه گیری شده و با نرم افزار ام سی ۲ آنالیزر^۸ مورد مقایسه قرار گرفت. در تمامی آزمایش های اعتبارسنجی نرم افزار، مشاهده شد که داده های به دست آمده از تطابق کاملی با طیف های مرجع برخوردار بودند.

۶.۲ پردازش داده های ثبت شده در آشکارساز می نی ایرانند
برای تعیین مشخصه های میون اندازه گیری شده، داده های جمع آوری شده و ثبت شده از آشکارسازی میون به صورت فایل های متنی باید به صورت غیربرخط مورد پردازش قرار بگیرند. برای هر سلول آشکارساز یک فایل متنی تولید می شود که یک ستون، زمان نمونه برداری تپ و ستون دوم معادل با انتگرال بار تپ الکتریکی است که با کالیبراسیون انرژی، این ستون به انرژی تبدیل می شود. در واقع هر سطر از این ستون ها نمایانگر مقدار انرژی ای است که یک ذره در آشکارساز در زمان مشخص برجای گذاشته است. برای پردازش داده های ثبت شده و جمع آوری شده از آشکارساز می نی ایرانند الگوریتمی نوشته شد که از بین انواع رویدادهایی محتمل که وارد آشکارساز می شوند، رویدادهای میون انتخاب شوند. در این الگوریتم یک «تپ شروع» (تولید شده به وسیله میون های کیهانی متوقف شده در سوسوزن) یک زمان سنج را روشن می کند؛ بنابراین زمان سنج تا

استفاده از یک سیستم داده برداری دیجیتالی که جهت این کار توسعه یافته بود جمع آوری و ثبت شد.

۵.۲ تعیین روش داده برداری از آرایه آشکارسازی می نی ایرانند

داده برداری از آرایه ی آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک توسط دیجیتالیزر ساخت شرکت کائن^۱ [۳۵] مدل وی-۲۱۷۳۰ انجام شد. این دیجیتالیزر از قابلیت داده برداری همزمان ۱۶ کانال متصل به آشکارساز برخوردار می باشد. سیگنال های آنالوگ خروجی هر یک از آشکارسازها به یک کانال دیجیتالیزر وارد شده و توسط مبدل های آنالوگ به دیجیتال با سرعت ۵۰۰ MSps نمونه برداری می شوند. نمونه های دیجیتال سیگنال ورودی توسط واحدهای پردازش سیگنال دیجیتال پردازش شده و اطلاعات مربوط به زمان، انرژی و شکل سیگنال به صورت برخط^۲ و غیربرخط^۴ مورد تحلیل قرار می گیرند. کتابخانه های آرایه شده توسط شرکت کائن امکان برقراری ارتباط و ذخیره داده های سیگنال حاصل از آشکارسازها را توسط رایانه فراهم می سازند. از آنجایی که سیگنال های ورودی به دیجیتالیزر دارای شکل نمایی می باشند، اندازه گیری دقیق ارتفاع پالس ها به سادگی و تنها با مبدل آنالوگ به دیجیتال میسر نخواهد بود. علاوه بر این، نیاز است، داده های زمانی سیگنال های آنالوگ با دقت قابل قبولی اندازه گیری و ثبت گردند. برای این منظور، مدهای مختلف داده برداری مانند مد ارتفاع پالس (پی ایچ ای^۵)، مد تبعیض گر شکل پالس (پی ایس دی^۶) و ... آرایه شده اند. با توجه به نیاز به دقت بالا برای ثبت انرژی و زمان داده های ذرات و پرتوهای ورودی به آشکارساز، در این پژوهش از مد پی ایچ ای استفاده گردید. این مد داده برداری شامل دو فیلتر اصلی به نام های فیلتر دوزنقه ای و فیلتر تریگر زمانی می باشد. فیلتر دوزنقه ای از سیگنال های نمایی ورودی به دیجیتالیزر به روش آرایه شده در مرجع [۳۶] سیگنال های دوزنقه ای ساخته به طوری که ارتفاع این سیگنال متناسب با ارتفاع سیگنال ورودی به دیجیتالیزر و در نتیجه انرژی ذره ی فرودی به آشکارساز می باشد. فیلتر دیگر مورد استفاده در مد پی ایچ ای فیلتر تریگر زمانی بوده که این فیلتر از سیگنال ورودی به آشکارساز یک سیگنال دوقطبی ایجاد می کند که لحظه ی عبور از صفر این سیگنال تعیین کننده ی زمان سیگنال آشکارساز می باشد.

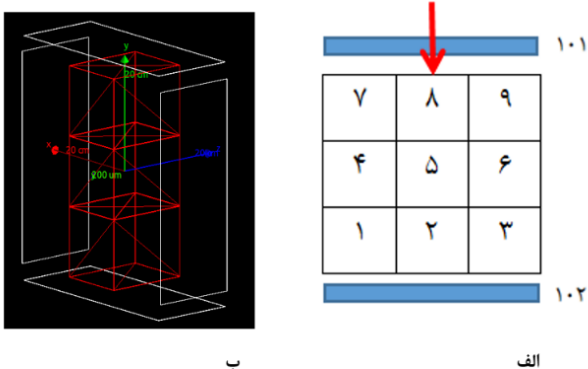
1. CAEN
2. V1730
3. Online
4. Offline
5. PHA: Pulse Height Analyzer
6. PSD: Pulse Shaping Discriminator

7. Sensitive Surface Detectors

8. MC2 Analyzer



توزیع زمانی ثابت واپاشی، طیف انرژی به‌جای‌مانده میون، در متلب توسعه داده شد و الگوریتم دوم، الگوریتم پردازش داده‌های تجربی بوده که برای ارزیابی آن از داده‌های شبیه‌سازی استفاده شده است. نتایج به دست آمده با الگوریتم اول با عنوان الگوریتم پردازش شبیه‌سازی و نتایج الگوریتم دوم با عنوان الگوریتم پردازش تجربی نامیده شدند. جهت استفاده از الگوریتم پردازش داده‌های تجربی و ارزیابی آن لازم است فرمت داده‌های شبیه‌سازی مشابه با ساختار ورودی داده‌های تجربی، به صورت لیست‌مد باشد. در واقع الگوریتم، کار پردازش داده‌های تولیدی از شبیه‌سازی میون را انجام می‌دهد که در آن زمان تولید تپ‌های الکتریکی از آشکارساز، انرژی فوتون‌های به‌جای‌مانده و مکان تولید تپ‌های الکتریکی تعیین می‌شوند. هم‌چنین داده‌ها به فرمتی که مناسب برای ورودی الگوریتم پردازش داده‌های تجربی است، تبدیل می‌شوند. سپس برای تعیین صحت الگوریتم پردازش داده‌های تجربی، خروجی داده‌های پردازش شده توسط الگوریتم پردازش شبیه‌سازی که به فرمت لیست‌مد می‌باشد، به‌عنوان ورودی به الگوریتم پردازش داده‌های تجربی اعمال می‌شود. در الگوریتم پردازش شبیه‌سازی و با به‌کارگیری هودوسکوپ‌های تعبیه شده در بالا و پایین آشکارساز، میون‌های عبوری و میون‌های متوقف‌شده شناسایی می‌شوند. از طرفی در الگوریتم پردازش تجربی اطلاعاتی از زمان ورود میون و یا زمان واپاشی میون در اختیار نیست. هدف این الگوریتم، تعیین زمان ورود میون و زمان واپاشی میون و به تبع آن ثبت انرژی به‌جای‌مانده از میون‌های متوقف‌شده، میون‌های عبوری و تعیین توزیع انرژی الکترون ناشی از واپاشی میون و هم‌چنین توزیع زمان واپاشی میون می‌باشد.



شکل ۵. الف) طرح‌واره‌ی آشکارساز می‌نی‌ایراد با قرارگیری دو هودوسکوپ، ب) طرح شبیه‌سازی آشکارساز با قرارگیری ۴ هودوسکوپ اطراف آشکارساز.

زمانی که «تپ پایان» تولید شود کار اندازه‌گیری بازه‌ی زمانی را انجام می‌دهد. تپ پایان ناشی از ذرات باردار تولیدی با انرژی بالاست که در طی واپاشی میون تولید شده است و بسته به این‌که ذرات اولیه‌ی میون منفی یا میون مثبت باشد، شامل یک الکترون و یا پوزیترون است. گستره‌ی زمانی بین شروع و پایان تپ، نمایان‌گر طول عمر میون برای یک رویداد واپاشی است (شکل ۲). تابع چگالی احتمال طول عمر میون، μ ، برای تعداد زیادی از رویدادها مطابق رابطه‌ی ۵ می‌باشد. در این رابطه با احتمال ۹۵ درصد طول عمر میون تعیین می‌شود. حال با به دست آوردن توزیع زمانی بین زمان‌های تپ شروع و تپ پایان، می‌توان توزیع زمانی واپاشی میون را رسم کرد و با برازش رابطه‌ی ۵ بر آن، طول عمر متوسط میون را به دست آورد.

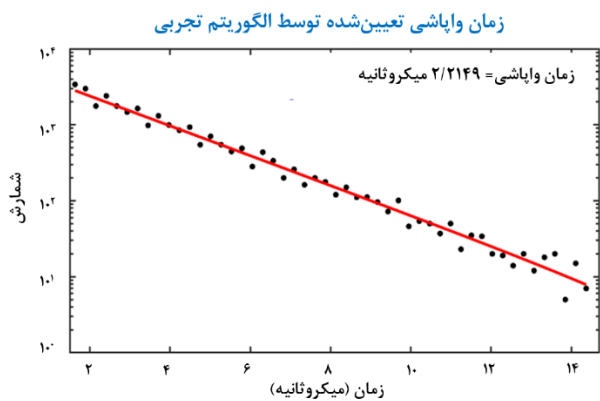
$$p(t) = \frac{1}{\tau_{\mu}} e^{-\frac{t}{\tau_{\mu}}} \quad (5)$$

از طرفی توزیع انرژی تپ شروع نمایانگر طیف لاندائو و توزیع انرژی تپ پایان که همان الکترون ناشی از واپاشی است نمایانگر طیف میشل (رابطه‌ی ۳) خواهد بود. هم‌چنین جهت تأیید عملکرد الگوریتم توسعه داده شده نیاز است تا با داده‌های مورد تأیید حاصل از شبیه‌سازی، الگوریتم مورد نظر اعتبارسنجی شود. در این مرحله با استفاده از شبیه‌سازی، داده‌هایی با فرمت مناسب (لیست‌مد) تولید شده و سپس با استفاده از الگوریتم توسعه یافته، طول عمر میون، طیف انرژی الکترون ناشی از میون و تابع توزیع لاندائو میون با انتخاب رویدادهای مناسب از میان داده‌های به فرمت لیست‌مد تعیین می‌گردد. سپس داده‌های به دست آمده جهت اعتبارسنجی، با داده‌های مشابه به دست آمده از شبیه‌سازی میون مقایسه می‌گردند. بنابراین با تولید داده‌هایی با فرمت مناسب (داده‌های لیست‌مد) الگوریتم پردازش داده مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

۳. نتایج و بحث

در شکل ۵ الف طرح‌واره‌ی آشکارساز می‌نی‌ایراد با قرارگیری دو هودوسکوپ و در شکل ۵ ب طرح شبیه‌سازی آشکارساز با قرارگیری ۴ هودوسکوپ اطراف آن مشاهده می‌شود. داده‌های شبیه‌سازی با استفاده از دو الگوریتم پردازش تحلیل و ارزیابی شد. الگوریتم اول، الگوریتم پردازش شبیه‌سازی بوده و صرفاً جهت استخراج ویژگی‌های میون اعم از طول عمر متوسط میون،

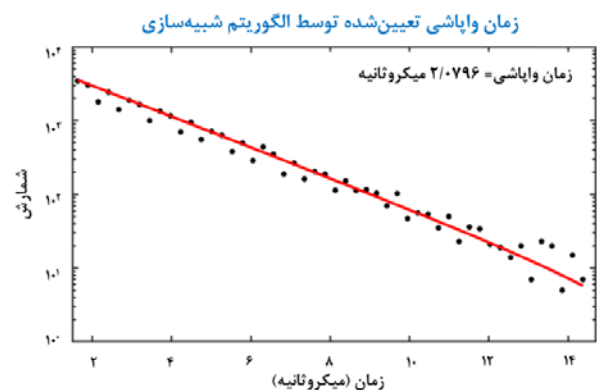




شکل ۷. زمان واپاشی میون با استفاده از الگوریتم پردازش تجربی به ازای ۱۱۱۵۰ رویداد میون.

در الگوریتم پردازش شبیه‌سازی با در نظر گرفتن میون‌های عبوری از هودوسکوپ‌های تعبیه شده در بالا و پایین آشکارساز، با توجه شکل ۸ مشاهده می‌شود توزیع انرژی به‌جای مانده ناشی از میون‌های عبوری، از توزیع لاندائو تبعیت می‌کند [۳۷]. از طرفی در الگوریتم پردازش تجربی، میون‌های عبوری شناسایی شدند و با دقت ۹۵٪، توزیع انرژی به‌جای مانده از آن‌ها با نتایج الگوریتم اول مطابقت داشت. علاوه بر این، همان‌گونه که در شکل ۹ مشاهده می‌شود در صورت رسم توزیع انرژی به‌جای مانده ناشی از میون‌های متوقف شده در آشکارساز، شاهد طیفی متشکل از قله‌های مورد انتظار در ضخامت‌های ۱۲، ۲۴ و ۳۶ سانتی‌متری از سوسوزن هستتیم (انرژی معادل حدود ۲۴، ۴۸ و ۷۲ مگا الکترون ولت). هم‌چنین برای تعیین طیف انرژی الکترون‌های ناشی از واپاشی میون، لازم است میون‌های متوقف شده در آشکارساز از سایر میون‌ها جدا شده و پردازش شوند. این کار با استفاده از هر دو الگوریتم پردازش شبیه‌سازی و تجربی انجام می‌شود. مطابق شکل ۱۰ طیف انرژی الکترون ناشی از واپاشی میون متناسب با طیف میشل است و هم‌چنین تطابق خروجی این دو الگوریتم به‌خوبی قابل مشاهده است. در شبیه‌سازی‌های انجام شده تعداد ۱۱۱۵۰ رویداد میون بررسی شد (شکل‌های ۶ تا ۱۰).

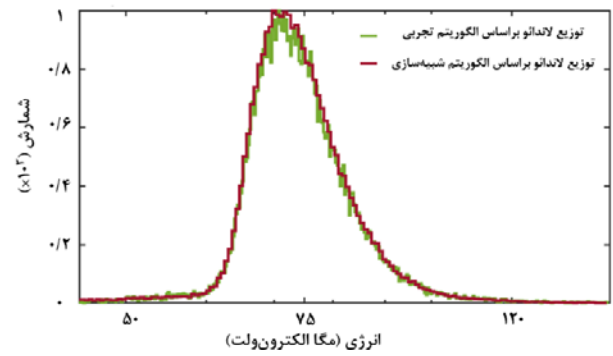
برای اعتبارسنجی صحت الگوریتم پردازش تجربی، طول عمر متوسط میون، توزیع انرژی میون متوقف‌شده و توزیع انرژی الکترون ناشی از واپاشی میون در دو حالت اندازه‌گیری شد. شکل ۶ توزیع اختلاف زمان واپاشی و آشکارسازی میون (طول عمر متوسط میون) با استفاده از الگوریتم پردازش شبیه‌سازی و شکل ۷ طول عمر متوسط میون با استفاده از الگوریتم پردازش تجربی را نمایش می‌دهد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، متوسط طول عمر میون با استفاده از الگوریتم پردازش شبیه‌سازی ۲/۰۷۹۶ میکروثانیه و مطابق شکل ۷، متوسط عمر میون با استفاده از الگوریتم پردازش تجربی مقدار ۲/۲۱۴۹ میکروثانیه به‌دست آمد. مشاهده شد الگوریتم پردازش تجربی با صحت ۹۶٪، می‌تواند تپ‌های الکتریکی ناشی از میون‌های کیهانی اعم از میون‌های عبوری و متوقف شده در داخل آشکارساز را شناسایی کند. در شبیه‌سازی، رویدادهای میون مشخص است. بنابراین در الگوریتم اول نیازی به انتخاب کردن رویدادهای میون نیست. تنها این الگوریتم از هر رویداد میون مشخص، انرژی الکترون و میون و بازه‌ی زمانی بین این دو را استخراج می‌کند. اما در الگوریتم دوم انتخاب رویدادهای میون از بین مجموعه سیگنال‌های مختلفی است که هیچ اطلاعاتی از آن نداریم. چرا که اساساً الگوریتم دوم برای مجموعه داده‌های تجربی و به‌دست آمده از آشکارساز ایجاد شده است. به عبارتی ورودی این الگوریتم مجموعه‌ای از تپ‌های خام است که مشخص نیست برای چه نوع ذره‌ای است.



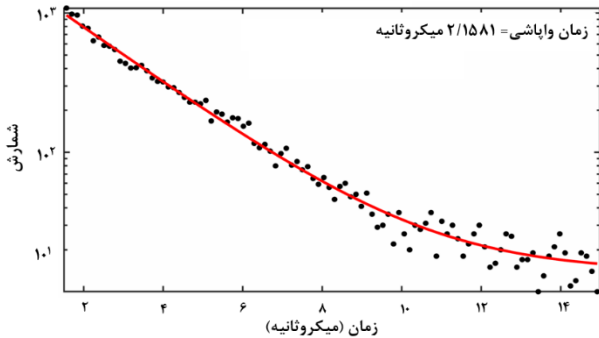
شکل ۶. زمان واپاشی میون با استفاده از الگوریتم پردازش شبیه‌سازی به ازای ۱۱۱۵۰ رویداد میون.



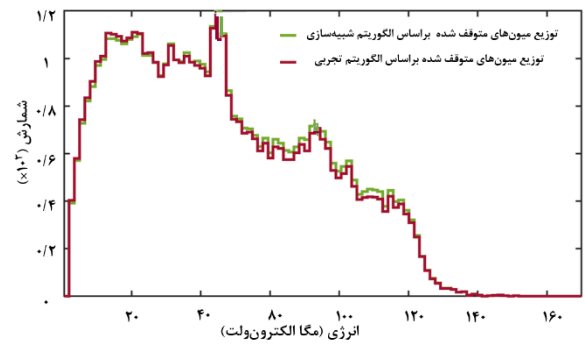
میون‌های کیهانی به مدت ۲۱ روز به‌دست آمده است را نمایش می‌دهد. شکل ۱۳ تابع توزیع انرژی به‌جای‌مانده از الکترون‌های ناشی از میون‌های متوقف‌شده در اندازه‌گیری میون‌های کیهانی به مدت ۲۱ روز با استفاده از الگوریتم پردازش تجربی را نمایش می‌دهد. در پردازش داده‌های تجربی، به‌ازای ۲۱ روز داده برداری ۱۲۲۷۰ میون شناسایی شد (شکل‌های ۱۱ تا ۱۳).



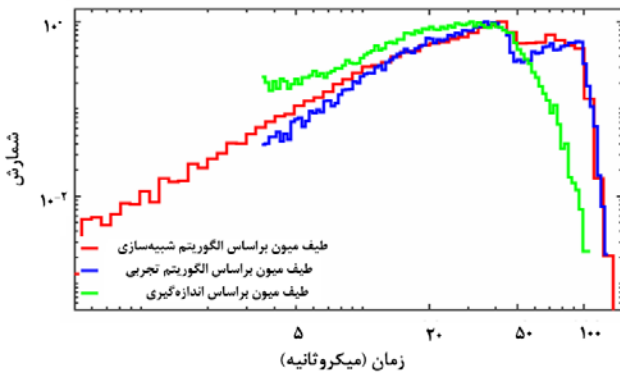
شکل ۸. توزیع لاندائو (انرژی به‌جای‌مانده از میون‌های عبوری) با استفاده از هر دو الگوریتم پردازش شبیه‌سازی و تجربی به‌ازای ۱۱۱۵۰ رویداد میون.



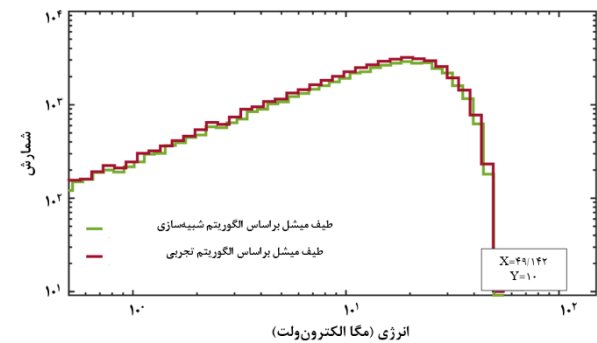
شکل ۱۱. تابع توزیع زمان واپاشی میون حاصل اندازه‌گیری تجربی میون‌های کیهانی به مدت ۲۱ روز با شناسایی ۱۲۲۷۰ تا میون.



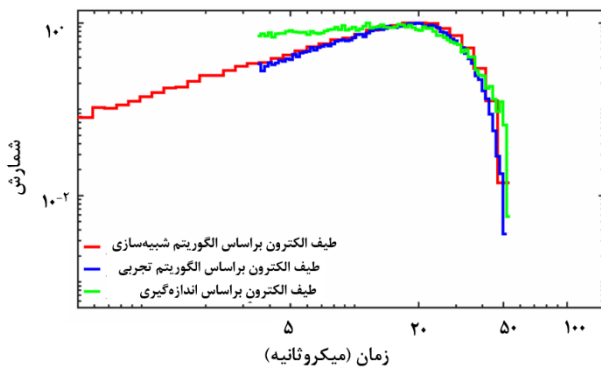
شکل ۹. طیف انرژی میون‌های متوقف‌شده در آشکارساز می‌نی‌ایراند با استفاده از دو الگوریتم پردازش شبیه‌سازی و تجربی به‌ازای ۱۱۱۵۰ رویداد میون.



شکل ۱۲. مقایسه‌ی تابع توزیع انرژی به‌جای‌مانده از میون‌های متوقف‌شده در اندازه‌گیری میون‌های کیهانی به مدت ۲۱ روز با استفاده از الگوریتم پردازش تجربی با شناسایی ۱۲۲۷۰ تا میون با نتایج شبیه‌سازی.



شکل ۱۰. طیف میشل به‌دست آمده با استفاده از دو الگوریتم پردازش شبیه‌سازی و تجربی به‌ازای ۱۱۱۵۰ رویداد میون.



شکل ۱۳. مقایسه‌ی تابع توزیع انرژی به‌جای‌مانده از الکترون‌های ناشی از میون‌های متوقف‌شده در اندازه‌گیری میون‌های کیهانی به مدت ۲۱ روز با استفاده از الگوریتم پردازش تجربی با شناسایی ۱۲۲۷۰ تا میون با نتایج شبیه‌سازی.

هم‌چنین با استفاده از داده‌های تجربی ناشی از اندازه‌گیری میون به مدت ۲۱ روز، تابع توزیع زمان واپاشی میون مطابق شکل ۱۱ به‌دست آمد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، طول‌عمر متوسط میون‌های کیهانی مقدار ۲/۱۵۸۱ میکروثانیه به‌دست آمد که تطابق خوبی با نتایج شبیه‌سازی و داده‌های نظری دارد. هم‌چنین توزیع انرژی به‌جای‌مانده میون‌های متوقف شده در داخل آشکارساز و طیف انرژی الکترون‌های ناشی از واپاشی میون مطابق شکل ۱۲ به‌دست آمد. شکل ۱۲، تابع توزیع انرژی به‌جای‌مانده ناشی از میون‌های متوقف‌شده که از اندازه‌گیری



۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش شناسایی و اندازه‌گیری میون‌های کیهانی به‌عنوان عوامل مداخله‌گر در آشکارسازی پادنوترینوی الکترونی که در سوخت‌های راکتورهای هسته‌ای تولید می‌شوند به دو صورت شبیه‌سازی و تجربی برای آشکارساز پادنوترینوی می‌نی‌ایراند مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا در آزمایشگاه مجازی (ابزار جینت ۴)، شرایط آشکارسازی میون‌های کیهانی شبیه‌سازی شد و میون و ویژگی‌های آن (مانند طول عمر متوسط میون، توزیع زمان واپاشی میون، توزیع انرژی میون‌های برجای‌مانده در داخل آشکارساز و هم‌چنین طیف الکترون‌های ناشی از واپاشی میون) و عوامل مؤثر بر آشکارسازی میون‌های کیهانی تعیین شدند. هم‌چنین به‌صورت تجربی داده‌های آشکارسازی میون‌های کیهانی به‌صورت دیجیتالی جمع‌آوری و با توسعه‌ی الگوریتم‌های پردازش مناسب، به‌صورت غیربرخط مورد تحلیل و پردازش قرار گرفته و ویژگی‌های میون شناسایی شدند. نتایج به‌دست آمده از آزمایش‌های تجربی و شبیه‌سازی مطابقت خوبی را نشان دادند که همین مسأله بیانگر صحت روند طی شده در بخش‌های شبیه‌سازی و تجربی است. با شناختی که از طیف انرژی‌آنی و تأخیری میون و بازه‌ی زمانی بین این دو سیگنال حاصل شد، به مجموعه شرایطی در الگوریتم تجربی دست پیدا کردیم که منجر به انتخاب رویدادهای صحیح میون از مجموعه داده‌های به‌دست‌آمده از آشکارساز شد. حال اگر مجموعه شرایط به دست آمده از الگوریتم تجربی انتخاب رویداد میون را در الگوریتم رویداد پادنوترینو اعمال و از مجموعه رویدادهای آن کم کنیم، موفق به حذف عامل مداخله‌گر میون می‌شویم. در نتیجه‌ی این پژوهش امکان آشکارسازی پادنوترینوهای تولید شده توسط راکتورهای هسته‌ای با حداقل تأثیر عوامل مداخله‌گری با استفاده از توسعه‌ی آشکارساز می‌نی‌ایراند فراهم شده است.

مراجع

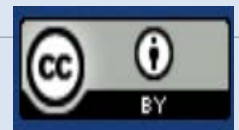
1. A. Bernstein, *Overview of Reactor Monitoring With Antineutrinos*, (In *Applied Antineutrino Physics Conference*, Sendai, Japan, Aug 3 2010), 1-25 (2010).
2. J.J. Duderstadt, L.J. Hamilton, *Nuclear reactor analysis*, Wiley New York, **84**, (1976).
3. A. Bernstein, A., et al., *Nuclear security applications of antineutrino detectors: current capabilities and future prospects*, *Science & Global Security*, **18(3)**, 127-192 (2010).
4. F. Faghihi, S.J.N.E. Mirvakili, *Burn up calculations for the Iranian miniature reactor: A reliable and safe research reactor*, *Nuclear Engineering and Design*, **239(6)**, 1000 (2009).
5. Y. Kuroda, et al., *A mobile antineutrino detector with plastic scintillators*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A.*, **690**, 41 (2012).
6. S. Oguri, et al., *Reactor antineutrino monitoring with a plastic scintillator array as a new safeguards method*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A. **757**, 33 (2014).
7. M. Battaglieri, et al., *An anti-neutrino detector to monitor nuclear reactor's power and fuel composition*, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.*, A. **617**, 209-213 (2010).
8. M. Battaglieri, *A proposal for a high segmented power reactor antineutrino detector*, In *Proceedings of the workshop Towards Neutrino Technologies*, (Abdus Salaam International Center for heoretical Physics, Genova, Italy, 13- 17 July, 2009)1-34.
9. PROSPECT Collab. <http://prospect.yale.edu>.
10. D. Norcini, (on behalf of the PROSPECT Collab.), *Development of PROSPECT Detectors for Precision Antineutrino Studies*, [arXiv:1510.09082](https://arxiv.org/abs/1510.09082) [physics.ins-det].
11. J. Ashenfelter, et al, *The PROSPECT Physics Program*, [arXiv:1512.02202](https://arxiv.org/abs/1512.02202) [physics.ins-det].
12. C. Lane, et al, *A new type of Neutrino Detector for Sterile Neutrino Search at Nuclear Reactors and Nuclear Nonproliferation Applications*, [arXiv:1501.06935v1](https://arxiv.org/abs/1501.06935v1) [physics.ins-det].
13. I. Alekseev, et al, *DANSS: Detector of the reactor AntiNeutrino based on Solid Scintillator*, [arXiv:1606.02896v3](https://arxiv.org/abs/1606.02896v3) [physics.ins-de].
14. I. Alekseev, et al. *DANSSino: a pilot version of the DANSS neutrino detector*, *Phys. Part. Nuclei Lett.*, **11**, 473 (2014).
15. V.A. Li, et al, *Mini Time Cube*, *Rev. Sci. Instrum*, **87**, 021301 (2016).
16. D. Mulmule, et al, *A plastic scintillator array for reactor based anti-neutrino studies*, [arXiv:1806.04421v2](https://arxiv.org/abs/1806.04421v2) [physics.ins-det].
17. H. Akhtari Qomi, et.al, *Monte Carlo Simulation of a Segmented Detector for Low-Energy Electron Antineutrinos*, *Physics of Atomic Nuclei*, **80**, 1119 (2017).



18. M. Fakhrizadeh Mahabadi, *Designing a large volume scintillation detector to detect reactor antineutrinos*, Nuclear Engineering Doctoral Thesis, Nuclear Science and Technology Research Institute (2016) (In Persian).
19. H. Akhtari Qomi, M.J. Safari, F. Abbasi Devani, *Low Energy Neutrino Generator on the Basis of FLUKA*, *Journal of Nuclear Science and Technology*, **85**, 8-1 (2017) (In Persian).
20. L.R.P. Sanchez, F. Izraelevitch, *Muon Lifetime Measurement in Chiapas and the Escaramujo project*, *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*, **866**, 012011 (2017).
21. H. Prihtyadi, et al, *Muon detector for the COSINE-100 experimen*, *Journal of Instrumentation*, **13(02)**, 1 (2017).
22. H. Yushi, et al, *A simple setup to measure muon lifetime and electron energy spectrum of muon decay and its Monte Carlo simulation*, [arXiv: 1608.06936](https://arxiv.org/abs/1608.06936) [physics.ins-det].
23. T. Coan, T. Liu, J. Yec, *A compact apparatus for muon lifetime measurement and time dilation demonstration in the undergraduate laboratory*, *American Journal of Physics*, **74**, 2 (2006).
24. J.A. Farmaggio, G.P. Zeller, *From eV to EeV: Neutrino cross sections across energy scale*, *Rev. Mod. Phys.*, **84** (3), 1307 (2010).
25. <https://www.britannica.com/science/muon>.
26. P.S. Canflanca, *Monte Carlo Simulation of a detector for Cosmic Rays*, Bachelor Thesis, Westfälische Wilhelms-Universität Münster, (2014).
27. J. Paepen, et al., *Characterisation of plastic scintillators used as an active background shield for neutron detection*, *Exploratory Research Project Intelligent Shield, Deliverable*, **10** (2016).
28. L. Tsoukalas, *Creation of a Geant4 Muon Tomography Package for Imaging of Nuclear Fuel in Dry Cask Storage*, *Purdue University, Project No. 13-5376*, (2016).
29. Y. Hu, et al, *A simple setup to measure muon lifetime and electron energy spectrum of muon decay and its Monte Carlo simulation*, [arXiv preprint arXiv:1608.06936](https://arxiv.org/abs/1608.06936), (2016).
30. V.A. Kudryavtsev, *Muon simulation codes MUSIC and MUSUN for underground physics*, *Computer Physics Communications*, **180**, 339 (2009).
31. S. Agostinelli, et al, *Geant4—a simulation toolkit*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A*, **506**, 250 (2003).
32. A.G. Bogdanov, et al, *Geant4 simulation of production and interaction of Muons*, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **53(2)**, 513 (2006).
33. M.J. Safari, *Differentiation method for localization of Compton edge in organic scintillation detectors*, *Radiation Physics and Engineering*, **4**, 9-16 (2019). [arXiv: 1610.09185](https://arxiv.org/abs/1610.09185) [physics.ins-det].
34. *Geant4 User's Guide for Application Developers by Geant4 Collaboration*, [Version: geant4 10.2](https://arxiv.org/abs/1610.09185) (2015).
35. V.T. Jordanov, et al, *Digital techniques for real-time pulse shaping in radiation measurements*, *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, **1**, 261 (1994).
36. www.caentechnologies.com.
37. V.A. Baranov, et al, *Study of the $\pi^+ \rightarrow e + \nu \gamma$ Decay Anomaly*, *Proposal for an Experiment at PSI: R-04-01.1*, (2004).

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

محمدجواد صفری، الهام تقوی، سحر هداوندی، حامد روحی، سروش محتشمی، محمدرضا قربانی، زهرا شهبازی‌راد (۱۴۰۲)، شبیه‌سازی و اندازه‌گیری تابش میون‌های کیهانی مداخله‌گر در آشکارساز می‌نی‌ایراند، ۱۰۴، ۶۲-۷۲

DOI: 10.24200/nst.2022.1049.1707

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1436.html

