



شناسایی و سنجش تابش فضایی میون با استفاده از سیستم طیف‌سنجی دیجیتال

علی بیگانه، امیدرضا کاکویی*

گروه فیزیک تجربی و کاربردی، پژوهشکده فیزیک و شتابگرها، پژوهشگاه علوم فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۸۳۶-۱۴۳۹۵، تهران-ایران

*Email: okakuee@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۷/۱۳ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۹/۲۴

چکیده

میون‌ها به دلیل سطح مقطع کوچک برای انجام واکنش، متداول‌ترین تابش فضایی قابل آشکارسازی در سطح زمین هستند. میون‌ها همانند سایر ذراتی که از طریق برخورد ذرات پرنرژی تولید می‌شوند، ناپایدار و دارای طیف توزیع طول عمر هستند. در این مقاله، انرژی و طول عمر تابش میون با استفاده از سیستم طیف‌سنجی دیجیتال اندازه‌گیری شده است. در روش ارائه شده همه ماژول‌های الکترونیک هسته‌ای آنالوگ حذف و فرایند شکل‌دهی به سیگنال‌ها و ثبت آن‌ها به صورت نرم‌افزاری انجام شده است. در این اندازه‌گیری، رویدادهای تابش زمینه به صورت هم‌زمان با استفاده از دو آشکارساز NaI(Tl) که در زاویه 90° نسبت به سطح افق نصب شده‌اند، آشکارسازی شدند. سیگنال‌های ثبت شده در پیش تقویت‌کننده دو آشکارساز، به صورت مستقیم با استفاده از یک دیجیتالایزر شکل‌دهنده موج نمونه‌برداری و پس از پردازش به صورت لیست داده‌ها ذخیره شدند. با برنامه‌نویسی روی لیست داده‌ها، در حدود 10^5 رویداد تابش میون در مدت زمان دو هفته تشخیص داده شده‌اند. با اندازه‌گیری فاصله زمانی بین رویدادهای تشخیص داده شده به عنوان تابش میون، طول عمر آن‌ها استخراج و با برازش تابع نمایی بر داده‌های تجربی، طول عمر میون $2.03 \mu\text{s}$ تعیین شده است. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که طول عمر به دست آمده برای ذره میون در این پژوهش با سایر داده‌های تجربی مطابقت دارد. گذار از الکترونیک هسته‌ای آنالوگ به دیجیتال در طیف‌سنجی تابش میون، سادگی، قابلیت اطمینان بالا، اندازه کوچک و وزن کم سامانه جمع‌آوری داده و امکان نصب آن بر روی ماهواره‌های تحقیقاتی را فراهم می‌کند.

کلیدواژه‌ها: سنجش تابش فضایی، طول عمر میون، آشکارساز NaI(Tl)، طیف‌سنجی دیجیتال

Identification and measurement of muon cosmic radiation using digital spectroscopy system

A. Biganeh, O. Kakuee*

Department of Experimental and Applied Physics, Physics and Accelerators Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box:14395-836, Tehran-Iran

Research Article

Received 5.10.2021, Accepted 15.12.2021

Abstract

Due to the low cross-section to perform the reaction, muons are the earth's most common detectable cosmic rays. Like the other particles produced by the collision of energetic particles, muons are unstable and have a lifetime distribution spectrum. This paper measures the energy and lifetime of the muon cosmic radiation using a digital spectroscopy system. In the presented method, all the nuclear electronics modules are omitted, and the process of forming the signals is recorded in the software. To perform this measurement, radiation events were detected in coincidence mode using two NaI (Tl) detectors installed at the angle of 90° concerning the horizon line. The signals recorded in the pre-amplifier of the two detectors were sampled directly using a waveform digitizer and, after recording, stored as the list mode data. By programming on the data list, about 10^5 muon events were detected over two weeks. Their lifetime is extracted by measuring the time interval between events detected as muon radiation. By fitting the exponential function to the experimental data, the muon lifetime is determined to be $2.03 \mu\text{s}$. The results show that this study's obtained lifetime for muon is consistent with the other experimental data. The transition from analog to digital nuclear electronics in muon radiation spectroscopy provides simplicity, high reliability, small size, light weight of the acquisition system, and the possibility to be installed on the research satellites.

Keywords: Identification of cosmic ray, Muon lifetime, NaI (Tl) detector, Digital spectroscopy



۱. مقدمه

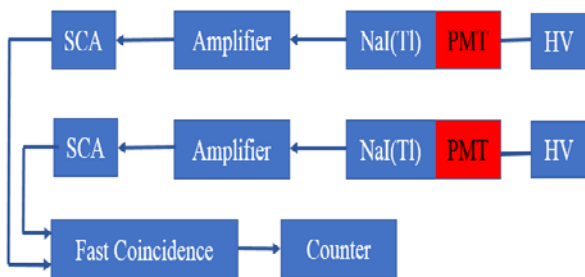
تابش‌های فضایی ذراتی هستند که معمولاً دارای انرژی در بازه ۱۰۰ MeV تا ۱۰ GeV هستند. این محدوده از انرژی برای پروتون‌ها معادل با سرعتی در حدود ۴۳ تا ۹۹ درصد سرعت نور است. تابش‌های فضایی اغلب به ذرات باردار پرنرژی گفته می‌شود که با سرعتی در حدود سرعت نور به اتمسفر و یا سطح زمین می‌رسند. منشأ تولید این ذرات، واکنش‌های هسته‌ای انجام شده در فضا است [۱]. ذرات پرنرژی اولیه تولید شده، سطح مقطع واکنش بالایی برای تولید ذرات ثانویه دارند. در اثر برخورد این ذرات با اتم‌های اکسیژن و نیتروژن در اتمسفر زمین، تابش‌های پرنرژی ثانویه‌ای مثل الکترون، پروتون، آلفا، ایکس، پیون و میون تولید می‌شوند که می‌توانند سطح زمین را بمباران کنند [۲].

با صرف‌نظر کردن از تابش‌های الکترومغناطیسی، به طور میانگین فراوانی ذرات تولید شده در اثر تابش‌های کیهانی عبارت است از: پروتون (۰.۸۹٪)، آلفا (۰.۹٪)، الکترون (۰.۱٪)، هسته‌های سنگین (۰.۱٪) و درصد کمی نیز به سایر ذرات تعلق دارد. این در حالی است که در مقایسه با سایر ذرات، میون‌ها به دلیل جرم کم و سطح مقطع واکنش بسیار کوچک‌تر نسبت به سایر ذرات، بیش‌ترین فراوانی را در سطح زمین دارند. میون‌ها که در دسته‌ی لپتون‌ها طبقه‌بندی می‌شوند، جرمی ۲۷۵ برابر جرم الکترون دارند و می‌توانند با طول عمری در حدود ۲/۲ میکروثانیه به صورت معادله‌های (۱) و (۲) به الکترون و نوترینو (یا پاد ذره آن‌ها) واپاشی کنند [۳].



میون‌ها در فاصله ۱۷ کیلومتری از سطح زمین (بالای اتمسفر) تولید می‌شوند و اگرچه طول عمر بسیار کوتاهی دارند، در اثر اتساع زمان^۱ به دلیل سرعت نسبی می‌توانند به سطح زمین برسند [۴]. میون‌ها در طول زمان پرواز خود می‌توانند از طریق یونیزاسیون، اندرکنش‌های کولنی، پراکندگی کامپتون و تابش برماشترالونگ انرژی خود را از دست بدهند. به طور معمول در هر دقیقه یک میون در هر سانتی‌متر مربع از سطح زمین قابل آشکارسازی است [۵]. از مهم‌ترین کاربردهای اندازه‌گیری تابش میون، مانیتورینگ سطح تابش‌های فضایی در آزمایشگاه‌های اندازه‌گیری اکتیویته‌های بسیار پایین [۶] و استفاده در روش رادیوگرافی میون برای استخراج اطلاعات از

اجسام بسیار بزرگ (همانند اهرام ثلاثه در مصر) است [۷]. متداول‌ترین چیدمان الکترونیک هسته‌ای برای آشکارسازی میون در شکل ۱ نشان داده شده است [۸]. در این چیدمان دو آشکارساز NaI(Tl) یا سوسوزن پلاستیک در فاصله ۵ cm از یکدیگر به صورت هم محور قرار می‌گیرند. با توجه به شار کم میون، امکان ثبت زمینه تابش گاما مثل ^{40}K (۱.۴۶۱ MeV) و ^{208}Tl (۲.۶۱۵ MeV) در سیستم هم‌زمانی وجود دارد. با این حال، به طور معمول تنها میون‌ها می‌توانند به صورت هم‌زمان در هر دو آشکارساز سیگنال‌های پرنرژی و هم‌زمان تولید کنند. سیگنال‌های کم انرژی مرتبط با تابش گاما در زمینه با استفاده از دو تبعیض‌گر تک کاناله (SCA^۲) از سایر سیگنال‌ها جداسازی می‌شوند و تنها سیگنال‌های پرنرژی می‌توانند وارد ماژول هم‌زمانی سریع^۳ شوند. برای تشخیص رویدادهای هم‌زمان، پهنای پنجره زمانی ۱۰۰ نانوثانیه در نظر گرفته می‌شود. سیگنال‌هایی که در این پنجره زمانی قرار می‌گیرند به عنوان تابش‌های میون ثبت شده در دو آشکارساز شناخته می‌شوند و توسط شمارنده ثبت می‌شوند. چیدمان ارایه شده در شکل ۱ حجم زیادی را اشغال می‌کند و تنها امکان شمارش رویدادهای تابش میون را فراهم می‌کند. نوآوری مشخص پژوهش ارایه شده در این مقاله، گذار از الکترونیک هسته‌ای آنالوگ به دیجیتال در طیف‌سنجی دقیق تابش‌های فضایی با استفاده از برنامه‌نویسی بر روی لیست داده‌های تابش زمینه است. این گذار فرصت‌های جدیدی را در این حوزه در اختیار محققان قرار می‌دهد که تا قبل از آن دستیابی به آن‌ها بسیار دشوار بود. در این مقاله، چیدمان الکترونیک هسته‌ای آنالوگ با دیجیتال جایگزین شده است و فرایند شکل‌دهی به سیگنال‌ها، هم‌زمانی دو آشکارساز و تشخیص میون‌ها به صورت نرم‌افزاری انجام شده است. این چیدمان امکان تشخیص میون‌ها، ثبت انرژی میون‌های متوقف شده و تعیین طول عمر آن‌ها را فراهم می‌کند.



شکل ۱. چیدمان الکترونیک هسته‌ای آنالوگ برای آشکارسازی تابش میون [۸].

2. Single Channel Analyzer (SCA)

3. Fast Coincidence

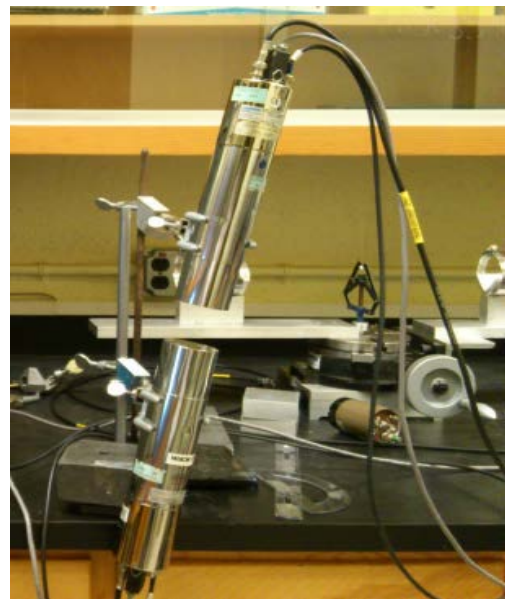
1. Time Dilation



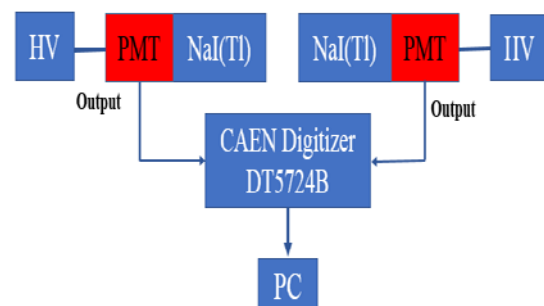
۲. روش انجام کار

چیدمان نوعی آشکارسازها برای اندازه‌گیری تابش میون در شکل ۲ نشان داده شده است. با توجه به این‌که تابش‌های فضایی میون دارای توزیع زاویه‌ای با یک مقدار بیشینه در زاویه ۹۰ درجه نسبت به سطح افق هستند [۴]، به منظور افزایش نرخ شمارش، در این پژوهش از چیدمان نوعی نشان داده شده در شکل ۲ استفاده شده است.

چیدمان الکترونیک هسته‌ای دیجیتال برای هم‌زمانی دو آشکارساز NaI(Tl) در شکل ۳ نشان داده شده است. ولتاژ ۷۰۰ ولت برای هر دو آشکارساز در نظر گرفته شده است. این چیدمان بر اساس استفاده از یک دیجیتالایزر ۴ کاناله ۱۴ بیتی (CAEN DT5724B) طراحی شده است که به صورت مستقیم و با فرکانس ۱۰۰ MHz از پیش‌تقویت‌کننده دو آشکارساز نمونه‌برداری می‌کند. در این چیدمان تبدیل‌گر آنالوگ به دیجیتال، اولین مدار بعد از پیش‌تقویت‌کننده سیگنال آشکارسازها است. این تبدیل‌گر دارای ۱۶۳۸۴ کانال برای ثبت انرژی رویدادهای ثبت شده در آشکارسازها است و امکان دستیابی به پهنای کانال کم‌تری را نسبت به MCAهای آنالوگ فراهم می‌کند.



شکل ۲. نحوه قرارگیری آشکارسازهای یدور سدیم.



شکل ۳. چیدمان الکترونیک هسته‌ای دیجیتال برای آشکارسازی تابش میون.

شکل ۴ پایش پردازش دیجیتال سیگنال را نشان می‌دهد. شکل موج خام از سیگنال‌های نمونه‌برداری شده (شکل ۴ الف)، توسط سفت‌افزار^۱ دیجیتالایزر^۲ (DPP-PHA) با استفاده از یک الگوریتم بازگشتی به سیگنال دوزنقه‌ای تبدیل می‌شود [۹]. اندازه‌گیری انرژی ذره بر روی ناحیه تخت بالایی از فیلتر دوزنقه‌ای (شکل ۴ ب) انجام می‌شود. ارتفاع این سیگنال نمونه‌برداری شده، متناسب با انرژی ذره است. در این ناحیه ارتفاع سیگنال مستقل از افت و خیزهای ناشی از جمع‌آوری بار در داخل آشکارساز است و بنابراین استفاده از فیلتر دوزنقه‌ای به جای فیلتر گاوسی می‌تواند تا حد زیادی اثر کسر بالستیک را حذف کرده و سبب بهبود مقدار قدرت تفکیک انرژی در سیستم آشکارسازی شود. از آن‌جا که در فرایند شکل‌دهی به سیگنال، خروجی به صورت مستقیم به عدد تبدیل می‌شود، سیگنال‌های نمونه‌برداری شده دستخوش اثرات مخرب الکترونیک هسته‌ای آنالوگ نخواهد شد و ناپایداری آن به شدت کاهش می‌یابد. مزیت‌های استفاده از سیستم طیف‌سنجی دیجیتال در مقایسه با آنالوگ در مرجع [۱۰] ارایه شده است. مدرج‌سازی طیف انرژی با استفاده از تابش‌های گاما ^{60}Co (۱.۱۷ و ۱.۳۳ MeV) و ^{137}Cs (۰.۶۶۲ MeV) و مدرج‌سازی طیف زمانی با استفاده از فرکانس نمونه‌برداری دیجیتالایزر انجام شده است. به منظور جلوگیری از ثبت رویدادهای مجازی در سیستم پردازش دیجیتال، از تکنیک قطع تریگر استفاده شده است. در این تکنیک، در طول مدت زمان شکل‌گیری سیگنال دوزنقه‌ای (دو برابر زمان شکل‌گیری سیگنال و زمان ناحیه تخت از فیلتر) در صورتی که رویداد دیگری مدار را تریگ کند، مدار قطع تریگر^۳ از ایجاد تریگ اضافی بر روی مدار جلوگیری کرده و رویدادهای مجازی که در پنجره هم‌زمانی قرار می‌گیرند از لیست داده‌ها حذف می‌شوند. این تکنیک در سیستم‌های پردازش آنالوگ هیچ معادلی ندارد و برای کمینه کردن ثبت این رویدادها به هنگام استفاده از سیستم جمع‌آوری داده آنالوگ، تنها می‌توان پنجره هم‌زمانی را تا حد ممکن کوتاه انتخاب کرد که خود سبب کاهش بازدهی شمارش خواهد شد.

1. Firmware
2. Digital Pulse Processing-Digital Pulse Height Analyzer (DPP-PHA)
3. Trigger Hold-Off Circuit
Journal of Nuclear Science and Technology



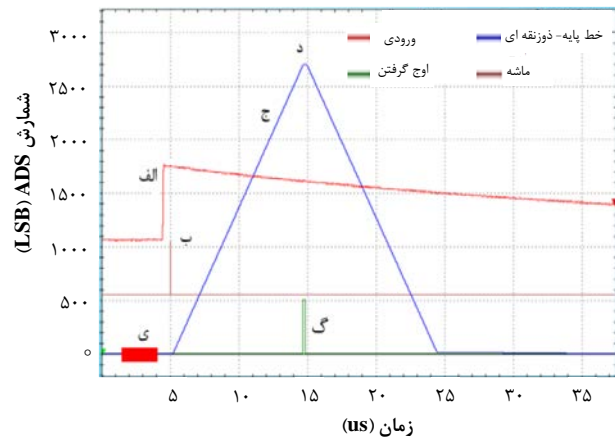
۳. یافته‌ها

طیف انرژی تابش زمینه ثبت شده در آشکارساز ۱ و طیف انرژی میون‌های متوقف شده در آشکارساز ۲ در شکل ۶ نشان داده شده است. این طیف با استفاده از برنامه‌نویسی بر روی ستون مربوط به انرژی هر رویداد در لیست داده‌ها ترسیم شده است. طیف تابش زمینه شامل تابش‌های گاما مربوط به رادیویزوتوپ‌های ^{40}K ، ^{214}Bi و ^{208}Tl است. به دلیل زمان پاسخ طولانی آشکارسازها، امکان اندازه‌گیری انرژی الکترون یا پوزیترون تولید شده در اثر تابش میون وجود ندارد. با این حال، این رویدادها به صورت انباشت سیگنال^۱ بر روی رویدادهای قبلی توسط دیجیتالایزر تشخیص داده می‌شوند و پس از کدگذاری، زمان ثبت آن‌ها بر روی لیست داده‌ها ذخیره می‌شود. زمان تولید ذرات الکترون یا پوزیترون در آشکارساز شماره ۲ نیز به عنوان زمان نابودی میون در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با در اختیار داشتن سیگنال ثبت میون به عنوان زمان تولد و زمان ثبت سیگنال الکترون یا پوزیترون به عنوان زمان مرگ میون در آشکارساز شماره ۲، طول عمر میانگین میون محاسبه شده است.

شکل ۷ طیف طول عمر میون را نشان می‌دهد. همانند طول عمر ذرات رادیواکتیو، طول عمر میون‌ها نیز به صورت میانگین‌گیری از تعداد زیادی از واپاشی‌های میون انجام می‌شود. در این پژوهش، تعداد 1.5×10^5 رویداد واپاشی میون در مدت زمان ۲ هفته اندازه‌گیری شده است. طول عمر میون با برازش تابع نمایی کاهشی به صورت نشان داده شده در رابطه ۳ بر داده‌های تجربی تعیین می‌شود.

$$N(t) = Ae^{-(t+t_0)}/\tau + N_0 \quad (3)$$

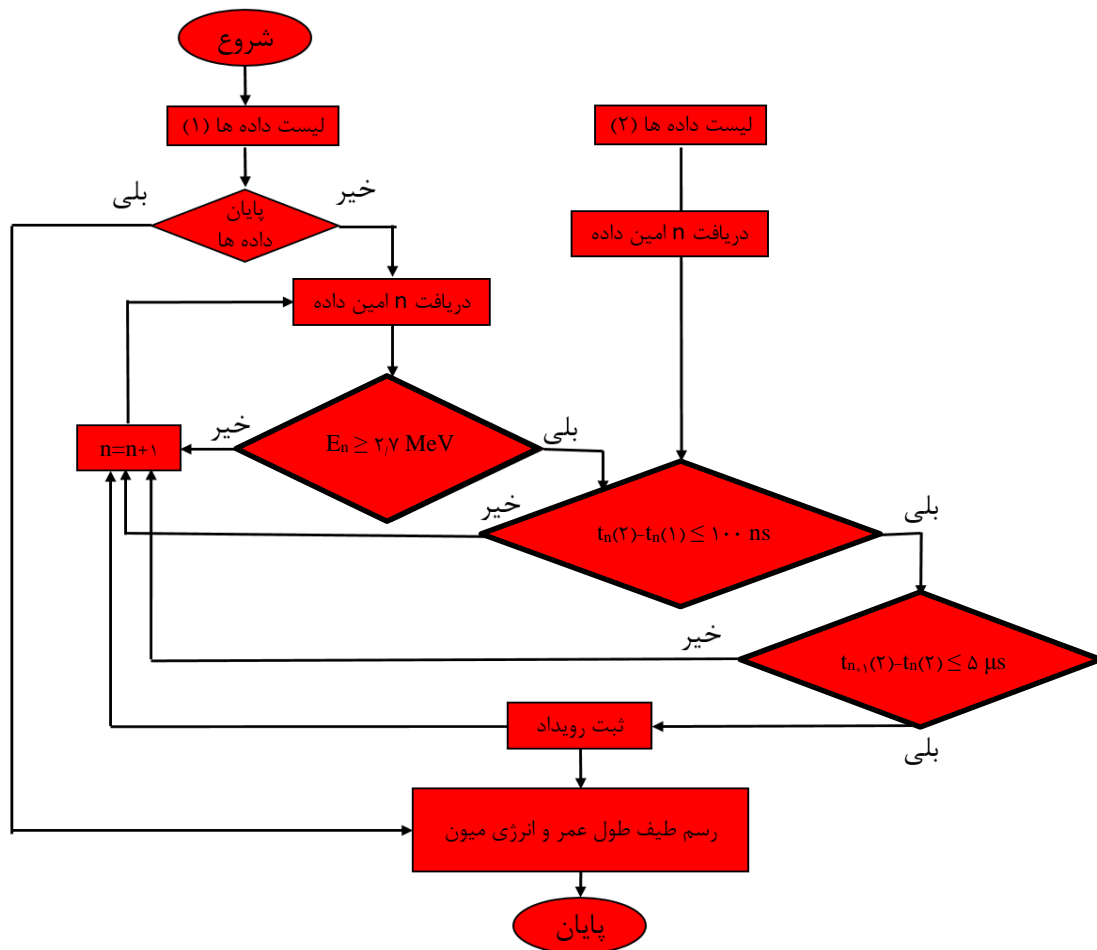
در این رابطه، t بازه زمانی بین سیگنال آشکارسازی و نابودی میون، τ میانگین طول عمر میون و N_0 رویدادهای تابش زمینه به دلیل ثبت رویدادهای هم‌زمانی تصادفی است. با برازش این تابع بر داده‌های تجربی با حد اطمینان ۰.۹۹۵، میزان طول عمر میون برابر با $2.03 \mu\text{s}$ تعیین شده است. این طول عمر در حقیقت میانگین طول عمر میون‌های منفی و میون‌های مثبت است. با تجزیه طول عمر اندازه‌گیری شده به دو مؤلفه به فرم تابع نمایی کاهشی، می‌توان طول عمر میون‌های منفی و مثبت را از یکدیگر جدا کرد. با این حال، این کار تنها هنگامی امکان‌پذیر خواهد بود که قدرت تفکیک زمانی آشکارساز مورد استفاده در محدوده تفاوت طول عمر این میون‌ها باشد. در صورت استفاده از دو آشکارساز پلاستیک با ابعاد بزرگ‌تر (به دلیل بازدهی کمتر نسبت به یدور سدیم) می‌توان با استفاده از الگوریتم ارایه شده در این پژوهش، طول عمرها را از یکدیگر تفکیک کرد.



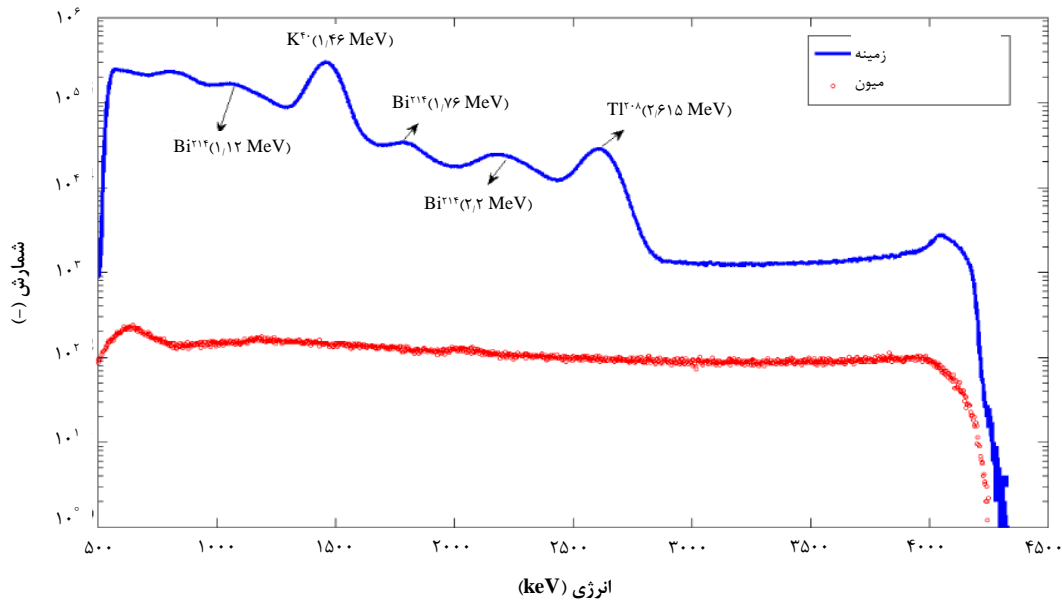
شکل ۴. پایش پردازش دیجیتال سیگنال، الف) سیگنال پیش‌تقویت‌کننده، ب) سطح تریگر، ج) زمان اندازه‌گیری ارتفاع سیگنال، د) زمان ناحیه تخت، گ) زمان نمونه‌برداری از ارتفاع سیگنال، ی) پنجره متحرک برای تعیین ارتفاع خط پایه.

در نهایت، رویداد ثبت شده توسط دو آشکارساز به صورت لیست داده‌ها ذخیره می‌شود. این لیست شامل زمان ثبت هر رویداد و انرژی متناظر با آن رویداد است. به منظور ثبت تابش‌های میون، رویدادهای تابش زمینه در طی ۱۴ روز به صورت لیست داده‌ها ذخیره شده است. حجم لیست داده‌ها در حدود ۱.۵ GB به ازای هر کانال از دیجیتالایزر است. تشخیص تابش میون از سایر رویدادهای تابش زمینه مطابق با الگوریتم نشان داده شده در شکل ۵ و با برنامه‌نویسی بر روی لیست داده‌ها با استفاده از نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. مطابق با این الگوریتم، با شروع از داده‌های ثبت شده در آشکارساز ۱، انرژی رویدادهای ثبت شده در این آشکارساز با انرژی تابش زمینه مقایسه می‌شود. در صورتی که انرژی ثبت شده بزرگ‌تر از 2.7 MeV باشد، این رویداد انتخاب می‌شود. در مرحله بعد، زمان ثبت این رویداد با رویداد ثبت شده در آشکارساز ۲ مقایسه می‌شود. در صورتی که اختلاف زمانی ثبت شده بین دو رویداد کم‌تر از 100 ns باشد، این دو رویداد هم‌زمان، ثبت یک میون در دو آشکارساز را تأیید می‌کنند. با توجه به معادلات (۱) و (۲)، در صورت توقف میون در آشکارساز ۲، دو سیگنال متوالی در فاصله زمانی کم‌تر از ۵ میکروثانیه در این آشکارساز تولید می‌شود که سیگنال اول در ارتباط با انرژی به جا گذاشته شده توسط میون و سیگنال دوم مربوط به انرژی الکترون یا پوزیترون تولید شده در این آشکارساز است. همان‌گونه که در الگوریتم شکل ۵ نشان داده شده است، پس از تشخیص میون، در صورتی که اختلاف زمانی رویداد ثبت شده در آشکارساز ۲ با رویداد بعدی ثبت شده در همین آشکارساز در پنجره زمانی ۵ میکروثانیه‌ای قرار بگیرد، رویداد دوم به عنوان سیگنال نابودی میون و اختلاف زمانی بین دو رویداد به عنوان طول عمر میون در نظر گرفته می‌شود.





شکل ۵. الگوریتم تشخیص تابش میون از لیست داده‌ها. در این شکل، $t_n(2)$ و $t_n(1)$ به ترتیب زمان‌های ثبت شده برای رویداد n ام در آشکارسازهای ۱ و ۲ است.

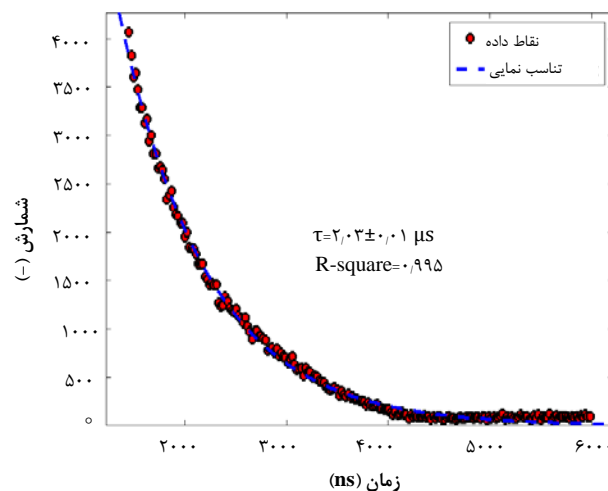


شکل ۶. طیف انرژی تابش‌های زمینه در آشکارساز ۱ و میون‌های متوقف شده در آشکارساز ۲.



مراجع

1. M. Aguilar, et al., *Towards understanding the origin of cosmic-ray electrons*, *Physical Review Letters*, **122.10**, 101101 (2019).
2. Ackermann, Markus, et al., *Detection of the characteristic pion-decay signature in supernova remnants*, *Science*, **339.6121**, 807-811 (2013).
3. D. Denisov, *Detection of Muons*, *Academic Lecture*, April, (2000).
4. R.B. Singh, *Introduction to modern physics*, *New Age International*, (2008).
5. A.A. Petrukhin, *The possibility of searching for new physics in cosmic rays*, *Physics of Atomic Nuclei*, **66.3**, 517-522 (2003).
6. R. Wordel, et al., *Study of neutron and muon background in low-level germanium gamma-ray spectrometry*, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, **369.2-3**, 557-562 (1996).
7. Morishima, Kunihiro, et al., *Discovery of a big void in Khufu's Pyramid by observation of cosmic-ray muons*, *Nature*, **552.7685**, 386-390 (2017).
8. Hu, Yushi, 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 (2016).
9. CAEN Electronic Instrumentation, 2018. MC2 Analyzer User Manual, vol. 3. Choudalakis, G., Gotsis, A.D., 2012. *Free volume and mass transport in polymer nano-composites*. *Curr. Opin. Colloid Interface Sci.*, **17** (3), 132-140.
10. A. Biganeh, et al., *Development of a 2D digital coincidence Doppler broadening spectrometer*, *J. Instrum.*, **14**, 02. P02017 (2019).
11. D.B. Chitwood, et al., *Improved measurement of the positive-muon lifetime and determination of the Fermi constant*, *Physical Review Letters*, **99.3**, 032001(2007).



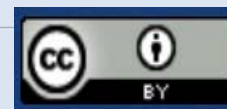
شکل ۷. طیف طول عمر میون‌های متوقف شده در آشکارساز شماره ۲.

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، با بهره‌گیری از فن‌آوری پردازش دیجیتال سیگنال یک چیدمان ساده برای تشخیص تابش‌های فضایی میون، اندازه‌گیری توزیع انرژی آن‌ها تا حدود ۴ MeV و طیف طول عمر آن‌ها ارایه شده است. طول عمر اندازه‌گیری شده در این پژوهش حدود ۷ درصد با مقدار گزارش شده ($2,197 \mu\text{s}$) در مرجع [۱۱] تفاوت دارد. میزان خطای اندازه‌گیری طول عمر میون‌ها به عواملی مثل آمار شمارش داده‌ها، فرکانس نمونه‌برداری از سیگنال‌ها، قدرت تفکیک زمانی سیستم آشکارسازی و الگوریتم شناسایی میون بستگی دارد. روش ارایه شده در این پژوهش امکان اندازه‌گیری شار و توزیع زاویه‌ای تابش فضایی میون در طول و عرض‌های جغرافیایی متفاوت را نیز فراهم می‌کند. در صورت جمع‌آوری این داده‌ها، امکان شبیه‌سازی تابش میون در یک ناحیه مورد نظر با استفاده از کد MCNP فراهم می‌شود. تکنیک پردازش دیجیتال ارایه شده در این کار پژوهشی قابلیت پیاده‌سازی بر روی سامانه‌های رادیوگرافی میون قابل حمل را دارد. به علاوه، این سامانه به اندازه کافی کوچک، سبک و قابل اعتماد است و قابلیت نصب بر روی ماهواره‌های تحقیقاتی را دارد.

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

علی بیگانه، امیدرضا کاکویی (۱۴۰۲)، شناسایی و سنجش تابش فضایی میون با استفاده از سیستم طیف‌سنجی دیجیتال، ۱۰۳، ۹-۱۴

DOI: 10.24200/NST.2023.1321

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1321.html

