

آشکارسازی میون‌های ناشی از تابش‌های کیهانی با استفاده آشکارساز سوسوزن پلاستیک

مریم قهرمانی گل و محسن خاکزاد

پژوهشکده ذرات و شتابگرها، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران

پست الکترونیکی: mohsen@ipm.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۲/۱۷؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۶/۲)

چکیده

در این تحقیق به آشکارسازی میون‌های ناشی از تابش‌های کیهانی در پژوهشکده ذرات و شتابگر، پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، پرداخته شده است. اندازه‌گیری سرعت و طول عمر میون‌ها توسط آشکارساز سوسوزن پلاستیک و لامپ تکثیرکننده نوری انجام شده است. در این تحقیق از دستگاه دیجیتال، به دلیل مزایایی همچون قابلیت اطمینان و سرعت عملکرد بالا، حجم کوچک و پاسخ دقیق‌تر، نسبت به دستگاه آنالوگ، به منظور داده‌برداری استفاده شده است. بر اساس نتایج تجربی حاصل از این تحقیق، میانگین سرعت میون‌ها حدوداً $10^8 \times (0.394 \pm 0.02/831)$ متر بر ثانیه ($\beta = 0.944 \pm 0.013/131$) و طول عمر میون حدود $(2/0.33 \pm 0.177)$ میکروثانیه به دست آمده که با نتایج مطالعات تئوری منطبق است. در این مطالعه از تجهیزات موجود در پژوهشکده ذرات و شتابگرها در پژوهشگاه دانش‌های بنیادی استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: تابش‌های کیهانی، آشکارساز سوسوزن پلاستیک، لامپ تکثیر کننده فوتونی، سرعت و طول عمر میون

۱. مقدمه

سوالات در حوزه فیزیک ذرات بنیادی و تابش‌های کیهانی است [۱]. مطابق معادله ۱ در اثر برهم‌کنش پروتون‌های پر انرژی با نیتروژن، اکسیژن و اتم‌های بالای جو، آبخاری از تابش‌های کیهانی در جو زمین ایجاد می‌شود که شامل ذرات پر انرژی پایون (از خانواده مزون‌ها) هستند.

$$p+n \rightarrow p+p+\pi^-, \quad (1)$$

$$p+n \rightarrow p+n+\pi^0,$$

سپس پایون‌های باردار پر انرژی تحت تأثیر نیروی برهم‌کنش

تابش‌های کیهانی ذرات پر انرژی (تقریباً نود درصد آنها را پروتون‌ها تشکیل می‌دهند) هستند که توسط سازوکارهای ناشناخته تا سرعتی نزدیک به سرعت نور شتاب داده می‌شوند. منشأ تابش‌های کیهانی را می‌توان به خورشید، ستارگان و بقایای انفجارهای ابرنواختری نسبت داد اما ماهیت چشمه‌های ایجاد کننده پرتوهای کیهانی و سازوکار شتاب‌گیری ذرات با انرژی‌های بالا، همچنان یکی از اساسی‌ترین و قدیمی‌ترین

هماماتسو^۲، منبع تغذیه ولتاژ بالا مدل N5۷۰ از شرکت CAEN برای تغذیه PMT، اسیلوسکوپ داده برداری دیجیتال^۳ مدل GDS۳۵۰۴ از شرکت GW INSTEK و نرم افزار داده برداری و آنالیز. لازم به ذکر است، آشکارساز مورد استفاده و PMT، از آزمایشگاه جهانی فیزیک ذرات بنیادی سرن^۴ فراهم شده اند و در آزمایشگاه پژوهشکده ذرات بنیادی گردآوری و آماده سازی برای اندازه گیری شده اند.

همان گونه که در شکل ۱ مشاهده می شود وقتی ذره بادار پر انرژی از مواد سوسوزنی عبور می کند، تولید جرقه یا نور می کند. در اصل تابش فرودی انرژی خود را در ماده سوسوزن، از طریق برهم کنش های مختلف شامل فوتوالکتریک، کامپتون و تولید زوج از دست می دهد و باعث جدا شدن الکترون های مداری آن می شود. الکترون جدا شده وقتی در مدار الکترونی فاقد الکترون، می افتد، نور گسیل می کند. اگر بلور به این نور شفاف باشد، عبور ذره باردار حامل انرژی با سینتیلایسون یا سوسوزنی نور گسیل شده از بلور نمایش داده می شود. نور تولید شده در آشکارساز توسط هدایت کننده های نوری به منظور تبدیل نور به پالس الکتریکی به PMT منتقل می شود. در PMT فوتون ها با برخورد به صفحه فوتوکاتد به الکترون تبدیل شده و سپس الکترون ها توسط صفحات دایند که با ولتاژ بالا یکسویه شده اند، تکثیر می شوند [۶]. به منظور داده برداری از سیگنال های خروجی PMT از دستگاه دیجیتال استفاده شده است. از مزایای این روش می توان به قابلیت اطمینان و سرعت عملکرد بالا، پیاده سازی آسان الگوریتم های پیچیده، حجم کوچک و پاسخ دقیق تر نسبت به دستگاه آنالوگ اشاره کرد. بنابراین در این دستگاه سیگنال های خروجی PMT توسط DSO داده برداری و سپس داده ها توسط نرم افزار نوشته شده به زبان C# (C Sharp) در محیط ویژوال استادیو ۲۰۱۷، ذخیره سازی و تحلیل می شود [۷].

در مراحل آماده سازی آشکارساز برای اندازه گیری، آشکارساز و بخش هدایت کننده نوری، به منظور جلوگیری از

ضعیف، به سرعت به میون ها و نوترینو های میون طبق معادله ۲ واپاشی می کنند.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_{\mu}, \quad (2)$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_{\mu},$$

میون از نظر بار الکتریکی مشابه ذره الکترون بوده و جرم آن برابر $105/658 \text{ MeV}$ است که در حدود ۲۰۰ برابر جرم الکترون است. طول عمر میون در حدود $2/2 \mu\text{s}$ و اسپین آن برابر $1/2 \hbar$ است. میون ها طبق معادله ۳ به الکترون ها و نوترینو های الکترون و میون واپاشی می کنند [۲].

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{\nu}_{\mu}, \quad (3)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_{\mu}$$

میون ها به واسطه سرعت کمتر در واپاشی، انرژی بالا و خاصیت برهم کنشی پایین نسبت به پایون ها، به مقدار بیشتری داخل مواد نفوذ می کنند. این ویژگی آشکارسازی میون را در سطح زمین میسر می کند و همواره در آزمایشگاه های ذرات از اهمیت بسزایی برخوردار بوده است [۳]. به منظور آشکارسازی میون از آشکارسازهایی همچون سوسوزن پلاستیک گازی استفاده می شود [۴]. استفاده از آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک به دلیل داشتن مزایایی همچون سرعت پاسخ مناسب، مقاومت در مقابل تابش ها، زمان تفکیک خوب، قابلیت تولید انبوه در اشکال مختلف و هزینه پایین مرسوم است [۵].

در این مقاله به آشکارسازی، اندازه گیری سرعت و طول عمر میون ها با استفاده از آشکارساز سوسوزن پلاستیک و دستگاه داده برداری دیجیتال پرداخته شده است.

۲. مواد و روش ها

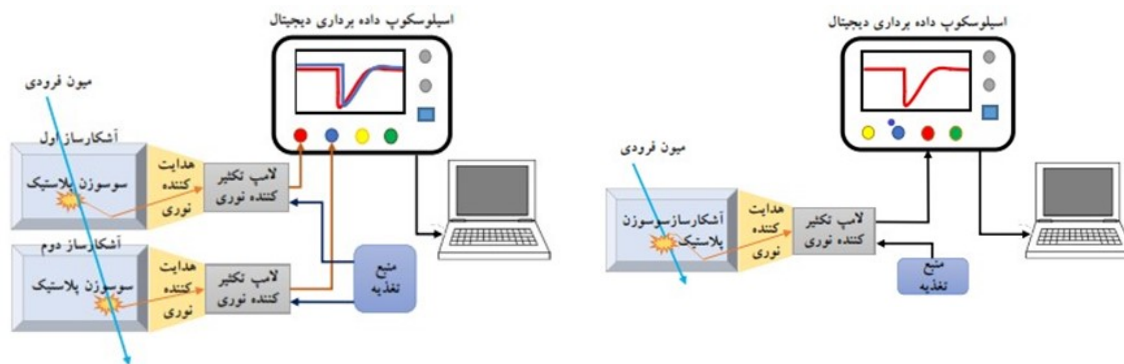
در شکل ۱ بلوک دیاگرام یک دستگاه دیجیتال آشکارسازی میون مشاهده می شود که شامل دستگاه های زیر است: آشکارساز سوسوزن پلاستیک NE۱۰۲A با ابعاد $1\text{cm} \times 20\text{cm} \times 20\text{cm}$ و $1\text{cm} \times 35\text{cm} \times 35\text{cm}$ ، هدایت کننده نوری^۱، لامپ تکثیر کننده نوری مدل R۶۴۲۷ از شرکت

۲. Hamamatsu

۳. Digital storage oscilloscope (DSO)

۴. CERN

۱. Light guide (LG)



شکل ۱. پیکربندی آشکارسازی میون.

شکل ۲. پیکربندی برای اندازه‌گیری سرعت میون.

شده از حرکت میون از آشکارساز ۱ به آشکارساز ۲ محاسبه می‌شود.

میون‌ها پس از ورود به آشکارساز طبق قانون بت-بلاخ متناسب با جنس آشکارساز و ضخامت، انرژی به جا می‌گذارند که این انرژی برای آشکارساز پلاستیک به ازای هر سانتی‌متر حدود ۲ MeV است. میون‌ها پس از واپاشی تولید الکترون، نوترینو الکترون و نوترینو میون می‌کنند که مدت زمان بین مشاهده میون تا واپاشی آن را طول عمر میون می‌نامند. همان‌گونه که می‌دانیم، تنها آشکارسازی میون و الکترون ناشی از واپاشی میون، در آشکارساز پلاستیک امکان‌پذیر است، بنابراین اندازه‌گیری طول عمر میون‌ها، با اندازه‌گیری فاصله زمانی سیگنال تولیدی ناشی از برهم‌کنش میون و الکترون ساطع شده از واپاشی میون امکان‌پذیر می‌شود. سازوکار اندازه‌گیری طول عمر میون در واقع مشابه اندازه‌گیری نیمه عمر مواد پرتوزا بوده که پدیده‌ای آماری است. معادله ۵ توزیع واپاشی میون را بیان می‌کند که در این معادله مقدار $N(t)$ تعداد میون‌های با زمان واپاشی t و N_0 تعداد میون‌ها با مقدار زمان واپاشی صفر است.

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

در این معادله λ ثابت واپاشی نامیده می‌شود و واحد آن عکس واحد زمان است. بنابراین طبق معادله ۶ طول عمر میون برابر عکس λ خواهد بود [۸].

$$\tau = 1/\lambda. \quad (6)$$

آلومینیوم به خوبی پوشانده نشت نور سوسوزنی تولید شده، ابتدا با کاغذ تیوک^۱ و برگه شدن و همچنین در ادامه به منظور جلوگیری از نفوذ نور از محیط بیرون، مجموعه آشکارساز و هدایت‌کننده نوری و PMT، با کاغذ سیاه و نوار چسب مشکی پوشانده شدند.

برای اندازه‌گیری سرعت میون‌ها مطابق پیکربندی نمایش داده شده در شکل ۲، میون از آشکارساز اول عبور کرده و پس از برجای گذاشتن مقداری از انرژی خود در آن، با عبور از یک فاصله معین وارد آشکارساز دوم می‌شود.

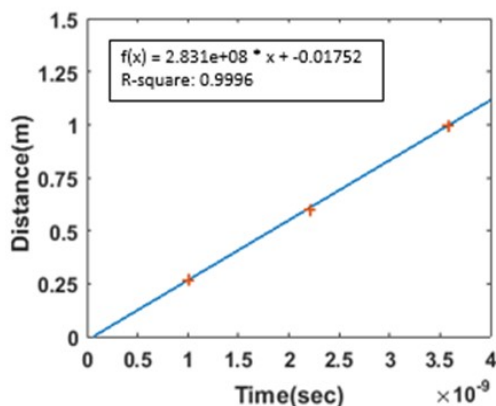
به منظور اطمینان از این که میون مشاهده شده در آشکارساز دوم، میون عبوری از آشکارساز اول است، در واقع از همزمانی سیگنال‌ها استفاده شده است. در زمان داده‌برداری دیجیتال، با استفاده از برنامه‌نویسی، در واقع از آشکارساز اول به عنوان تریگر استفاده شده است و از میان تعداد زیادی از سیگنال‌هایی که به آشکارساز دوم می‌رسد، سیگنال‌هایی انتخاب شده‌اند که همزمان از آشکارساز اول عبور کرده باشند.

به منظور اندازه‌گیری سرعت میون‌ها، می‌بایست اختلاف زمان سیگنال‌های خروجی دو آشکارساز که در پنجره همزمانی هستند (پنجره همزمانی بسته به فاصله تنظیم می‌شود؛ در اینجا مقدار ۱۰ نانوثانیه قرار داده شد)، اندازه‌گیری شود.

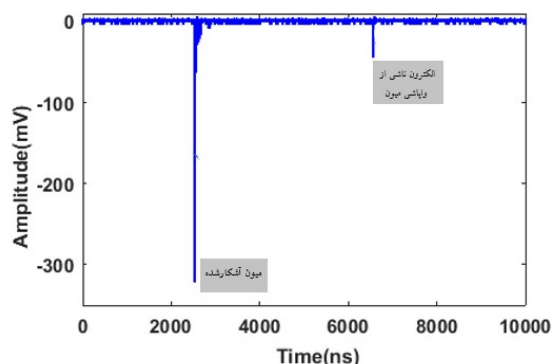
$$v = \frac{\Delta y}{\Delta t}, \quad (4)$$

طبق معادله ۳، سرعت میون از تقسیم فاصله بین دو آشکارساز بر میزان اختلاف زمان سیگنال‌های دو آشکارساز (زمان سپری

۱. Tyvek



شکل ۳. پیکربندی آزمایشگاهی آشکارسازی میون و اندازه‌گیری سرعت و طول عمر آن. شکل ۴. نمودار سرعت میون در فواصل مختلف دو آشکارساز و معادله برازش.



شکل ۵. پالس عبور میون از آشکارساز و واپاشی آن و ایجاد الکترون.

۳. اندازه‌گیری و نتایج

برای اندازه‌گیری سرعت میون‌ها، داده‌برداری از دو آشکارساز در سه فاصله معین از یکدیگر، به ترتیب ۲۷، ۶۰ و ۱۰۰ سانتی‌متری صورت گرفته است. در شکل ۳، دستگاه آشکارسازی میون و اندازه‌گیری سرعت و طول عمر آن، در آزمایشگاه نمایش داده شده است.

با اندازه‌گیری اختلاف زمان دریافت سیگنال از دو آشکارساز، توسط اسپیلوسکوپ در فاصله‌های مختلف و استفاده از معادله ۴ می‌توان سرعت میون‌ها را محاسبه کرد. با زمان‌گیری از سیگنال‌های خروجی دو آشکارساز در فواصل مختلف، می‌توان سرعت میون‌ها را با خطای قابل قبولی به دست آورد.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، وجود عرض از مبدأ در معادله نشان می‌دهد که در فاصله صفر سانتی‌متری دو آشکارساز از یکدیگر، اختلاف زمان دریافت سیگنال از دو آشکارساز مقدار مثبت غیر صفر دارد که این اختلاف زمان را می‌توان به عوامل مختلفی مانند متفاوت بودن طول سیم‌ها و ابعاد دو آشکارساز نسبت داد.

برای اندازه‌گیری طول عمر میون‌ها، داده‌برداری از آشکارسازها، در یک پنجره زمانی ۱۰ میکروثانیه‌ای انجام شد. شکل ۵ نمونه‌ای از سیگنال آشکار شده ناشی از میون واپاشی شده و سیگنال حاصل از الکترون تولیدی آن را نشان می‌دهد. به منظور اطمینان از صحت داده‌ها، نتایج حاصل از داده‌برداری

از آشکارساز در مدت زمانی ۲۴ ساعت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته‌اند. طبق معادله توزیع واپاشی میون، فرایند واپاشی میون و تولید الکترون از یک رابطه‌ی نمایی پیروی می‌کند. بنابراین با استفاده از برازش تابع نمایی روی داده‌های تجربی، طول عمر میون‌ها حدود $(2/033 \pm 0/177)$ میکروثانیه اندازه‌گیری شد. طول عمر گزارش شده، در واقع طول عمر میون‌های مثبت و منفی است. میون‌های منفی به دلیل برهم‌کنش با هسته‌های کربن و هیدروژن، طول عمر کمتری از میون‌های مثبت خواهند داشت [۹].

۵. سپاس‌گزاری

نویسندگان تمایل دارند از آقای دکتر محمدی و آقای دکتر بقراطی به دلیل همکاری فراوان و فراهم کردن امکانات آزمایشگاهی، سپاس‌گزاری ویژه کنند. همچنین از دکتر آلدو پنزو از CERN به دلیل فراهم کردن تجهیزات آشکارسازی و از پیشنهادات سودمند دکتر اوارت بلک مور از TRIUMF صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنند.

۴. نتیجه‌گیری

از بررسی نتایج اندازه‌گیری با استفاده از دستگاه دیجیتال، سرعت میون‌ها، $10^8 \times (2/831 \pm 0/0394)$ متر بر ثانیه

مراجع

1. C Grupen, "Astroparticle Physics", Springer-Verlag. (2005) 456.
2. K F Peter Grieder, "Cosmic Rays At Earth: researcher's reference manual and data book", 1th edition, Elsevier (2001) 1117.
3. A Bachri, P Grant, and A Goldschmidt, *Journal of the Arkansa Academy of Science* **64** (2010) 27.
4. C Grupen, B A Shwartz, "Particle Detectors", Cambridge University Press. 2th edition (2008) 676.
5. S Hohara, F Saiho, J Tanaka, S Aoki, Y Uozumi, and M Matoba, *IEEE* **48**, 4 (2001) 1172.
6. G F Knoll, "Radiation Detection and Measurement", Jon Wiley and Sons, Inc. 3th edition (1999) 796.
7. <https://code.visualstudio.com/docs/languages/csharp>.
8. K S Krane, "Introductory Nuclear Physics", 3th edition, Wiley (1987) 845.
9. B Rossi, "High Energy Particles", Prentice Hall (1952).
10. National Inst. of Standards and Technology. Online Database, <http://physics.nist.gov> (2007.)