

مطالعه میکروزیمتری بر ردیابی میون در پایش پرتوهای زمینه

سیامک هوشمند کوچی^۱ و احمد اسماعیلی ترشابی^{۱*}

۱. گروه مهندسی هسته‌ای، دانشکده علوم و فناوری‌های نوین، دانشگاه تحصیلات تکمیلی صنعتی و فناوری پیشرفته، کد پستی ۷۴۳۱۵۱۱۷، کرمان - ایران

چکیده:

امروزه تحقیقات گسترده‌ای روی ذرات میون رسیده به جو در گروه پرتوهای کیهانی و بررسی خواص فیزیکی آن‌ها در حال انجام است. بنابراین، ابزار پایش و اندازه‌گیری ذرات میون با خواص فیزیکی خاص حائز اهمیت است. در این کار یک مطالعه میکروزیمتری روی ذرات میون با استفاده از شبیه‌سازی آشکارسازهای سوسوزن انجام شده است. برای این منظور، دو بلور سوسوزن رایج NaI(Tl) و BGO^۱ توسط کد مونت کارلویی فلوکا شبیه‌سازی شده و برهمکنش ذره میون در این دو آشکارساز در مقیاس میکرو مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله شامل مسیر سه‌بعدی حرکت ذره میون در انرژی‌های متفاوت با حجم حساس آشکارساز، محل‌های تولید نور در بلور سوسوزن، مقدار انرژی اتلافی در هر برخورد، بهره نوری هر آشکارساز و اتلاف انرژی کل به صورت کمی ثبت شده است. تحلیل روی نتایج میکروزیمتری حاصله منجر به فهم بهتری از اتلاف انرژی و ردیابی سه‌بعدی میون در برهمکنش با هر آشکارساز سوسوزن می‌گردد. از آنجاکه سیگنال نهایی قویاً به بهره نوری و طبعاً به تعداد و مکان برخوردهای میون با حجم کریستال دارد، نتایج حاصل از این کار می‌تواند در شبیه‌سازی ابعاد و مواد بکار رفته در ساخت آشکارسازهای سوسوزن مسئول پایش محیطی پرتوهای طبیعی کمک‌کننده باشد.

کلیدواژه‌ها: پایش محیطی، ذره میون، میکروزیمتری، آشکارسازهای سوسوزن، شبیه‌سازی مونت کارلو.

Micro-dosimetry study on Muon tracking at monitoring of natural background radiation

Siamah Hooshmand Koochi¹, Ahmad Esmaili Torshabi^{1,*}

1. Faculty of Sciences and Modern Technologies, Graduate University of Advanced Technology, Postal code: 7631818356 Kerman, Iran

Abstract:

Nowadays, various investigations are accomplishing on Muon particles emitted from cosmic rays, considering their physical properties. Therefore, monitoring instruments for measuring of Muons with specific properties are remarkably important. In this work, a micro-dosimetry study has been done on Muon beams using simulation of scintillation detectors. For this aim, two common available scintillators as NaI(Tl) and BGO² were simulated using Monte Carlo FLUKA simulation code and Muon particles interaction with the materials of these two detector was taken into account at micro-dosimetry scale. Final results include 3D motion tracking of a Muon particle at various energies in detector volume, the coordinate of visible light photons inside scintillation crystal, the amount of deposited energy at each collision of Muon particle with matter, optical yield and total energy deposition were recorded, quantitatively. The analyzing of results causes better understanding of energy deposition and 3D particle tracing in interacting with each scintillation detector. Since, the final signal depends strongly on optical yield and in other word, the number and location of Muon interactions with detector critical volume, the obtained results can help one at detector designing and also selecting proper materials during fabricating of scintillation detectors as responsible for natural radiation monitoring.

Keywords: Environmental monitoring, Muon Particle, Micro-dosimetry, Scintillation Detectors, Monte Carlo Simulation

^{۱,*} Email: a.esmaili@kgut.ac.ir

^۲ Bismuth germanium oxide

۱. مقدمه

پرتوهای طبیعی زمینه به پنج دسته در کتاب آشکارسازی نول تقسیم‌بندی شده‌اند [1] که به‌طور طبیعی در محیط اطراف ما حضور دارند و سرچشمه این پرتوها، (۱) پرتوهای کیهانی رسیده به جو زمین و (۲) پرتوهای ناشی از عناصر رادیواکتیو موجود در مواد تشکیل‌دهنده زمین هستند [2-3]. پرتوهای کیهانی که به سطح زمین می‌رسند، پرتوها یا ذرات یونیزان پرنرژی‌ای هستند که منشاء بی‌خارج از جو زمین دارند. بخشی از این پرتوها توسط خورشید و یا دیگر ستارگان تولید شده و با برخورد به جو زمین شارژی از پرتوها یا ذرات ثانویه و هسته‌های رادیواکتیو ایجاد می‌کنند [4-5]. یکی از این ذرات میون هست که نتیجه واپاشی همین هسته‌های رادیواکتیوی است که در جو زمین تولید شده‌اند. این ذره در سال ۱۹۳۶ توسط کارل اندرسون^۳ در حین تحقیق روی پرتوهای کیهانی کشف و شناسایی شد [6-7]. یکی از موضوعات مورد اهمیت میون، آشکارسازی و اندازه‌گیری آن در پایش‌های محیطی از نقطه‌نظر فیزیک بهداشت می‌باشد تا دز دریافتی ناشی از آن توسط انسان مشخص گردد. جدای از بحث پرتوزایی میون و پایش محیطی آن، امروزه استفاده از میون در توموگرافی و رادیوگرافی صنعتی در حال گسترش می‌باشد که این مهم استفاده از میون‌های کیهانی را حائز اهمیت می‌سازد [8-10]. زیرا شدت ذرات میون نسبت به دیگر پرتوهای کیهانی بالاتر است. شدت میون از فاصله ۲ کیلومتر از سطح دریا حدود ۱۰ برابر بیشتر از پروتون و شدت تابش بقیه ذرات در مقابل میون بسیار ناچیز است. بر اساس تحقیقات انجام‌شده میانگین شدت تابش در هر دقیقه بر سطح دریا حدود ۱۰۰۰۰ ذره میون بر مترمربع می‌باشد. بنابراین، با توجه به در دسترس بودن میون در فضا با شار مناسب و اینکه نیاز به یک مولد باریکه میونی همچون شتاب‌دهنده‌های ذرات باردار نداریم، کاربردهای متنوعی می‌توان برای آن در نظر گرفت که کار روی آن‌ها در مرحله تحقیق است. با توجه به پتانسیل‌های کاربردی میون در کنار پایش محیطی آن، اهمیت آشکارسازی آن دوچندان می‌شود. از این‌رو، در این تحقیق ما بر آنیم که با بررسی میکرودمتری ذره میون به ردیابی سه‌بعدی آن داخل حجم کریستال سوسوزن بپردازیم (در کد فلوکا امکان محاسبات کوچک‌تر از میکرومتر وجود ندارد). این کار منجر به درک بهتری در زمینه عمق نفوذ میون، حرکت میون، اتلاف انرژی میون در هر نقطه برخوردی و مجموع اتلاف انرژی کل یک‌ذره میون در یک انرژی داده‌شده خواهد شد. لازم به ذکر است در توموگرافی صنعتی با استفاده از میون از آشکارسازهای سوسوزن استفاده شده است. در این تحقیق هدف بررسی کمی همین نوع آشکارساز در پایش محیطی میون از نقطه‌نظر فیزیک بهداشت پرتو می‌باشد [11].

برای انجام این کار، از کد مونت کارلویی فلوکا برای شبیه‌سازی باریکه میون برخوردی و آشکارساز سوسوزن به‌عنوان ماده هدف استفاده شده است. فلوکا یک برنامه جامع تأیید شده بر پایه محاسبات مونت کارلو می‌باشد که توانایی‌های زیادی در شبیه‌سازی، محاسبه اندرکنش ذرات در فیزیک و مهندسی در زمینه‌های پرتودرمانی، حفاظ سازی در پرتو پزشکی، آشکارسازی پرتوهای یونیزان، مطالعات اشعه‌های کیهانی، دزیمتری، فیزیک پزشکی و زیست‌شناسی پرتویی را داراست [12-14]. نتایج به‌دست‌آمده شامل تغییرات بهره نوری کریستال آشکارساز سوسوزن با تغییرات انرژی میون، ردیابی مکانی یک‌ذره میون با انرژی دلخواه و اتلاف انرژی یک ذره در هر برخورد در دو کریستال NaI(Tl) و BGO به‌صورت مقایسه‌ای می‌باشد که بهره نوری با شیب کم افزایش می‌یابد.

در آشکارسازهای سوسوزن، از برهمکنش پرتو ورودی با حجم کریستال کسری از انرژی جایگذاری شده پرتو برخوردی، به نور مرئی تبدیل می‌شود. فوتون‌های نور مرئی تولید شده که در نتیجه انتقال الکترون‌های مداری اتم‌های کریستال سوسوزن برای رهایی از برانگیزش ساطع می‌شوند، مبنای تولید سیگنال می‌گردند. لازم به ذکر است که به مواد تشکیل‌دهنده کریستال برخی از آشکارسازهای سوسوزن، عناصری به‌عنوان ناخالصی اضافه می‌شود تا بهره نوری آشکارساز را بالا ببرد [15].

³ Carl David Anderson

۲. روش کار

برای انجام این شبیه‌سازی میکرودمتری از کد مونت کارلویی FLUKA نسخه ۲۰۱۱ استفاده شده است که این کد توسط دو مرکز CERN در سوئیس و مرکز INFN⁴ در ایتالیا طراحی و توسعه داده شده است. موارد استفاده این کد مونت کارلویی مورد تأیید در محاسبات، بررسی و مشاهده اندرکنش‌های ذرات با ماده، پوشش طیف گسترده‌ای از برنامه‌های کاربردی در حفاظ سازی شتابدهی هادرون‌ها، کالری متری، فعال‌سازی نوترونی، دزیمتری، شبیه‌سازی آشکارسازها، بررسی اشعه‌های کیهانی، فیزیک نوترینو، پرتودرمانی و غیره را شامل می‌شود [12-14]. برای به دست آوردن داده‌هایی هرچه دقیق‌تر در این شبیه‌سازی، آشکارساز سوسوزن درون کره‌ای از هوا قرار گرفته که این کره نیز درون یک کره خلاء قرار دارد. برای انجام پژوهش، ابتدا بلور سوسوزن NaI با مقدار معینی ناخالصی تألیف آلاینده شد. بلور سوسوزن مدنظر با هندسه استوانه‌ای شبیه‌سازی شده و محور مرکزی آن به موازات محور Z دستگاه مختصات کارترین و در جهت انتشار باریکه است. ذرات میون به صورت توزیع فضایی گاوسی در راستای محور مرکزی کریستال استوانه‌ای و در فاصله ۱۰ سانتی‌متری از سطح بلور به آن تابش داده شده است. برای داشتن بهره نوری متنوع، باریکه میون بانرژی‌های متفاوت با بلور برهمکنش داده شده است. لازم به ذکر است که عدد اتمی مؤثر بلور ۵۱ و چگالی آن ۳/۶۵ گرم بر سانتیمتر مکعب در نظر گرفته شده است. برای انجام محاسبات در ابعاد میکرو از زیر برنامه‌های خاص شبیه‌سازی شده در فلوکا استفاده گردیده است و بعد از اجرای برنامه نوشته شده در فلوکا، یک سری محاسبات پس از پردازش یا (Post-processing) روی خروجی‌های اولیه انجام گردید تا خروجی نهایی حاصل گردد. بخشی از محاسبات پس از پردازش در فلوکا و بخشی دیگر با انتقال داده‌ها در برنامه نرم‌افزاری MATLAB انجام شده است.

۳. یافته‌ها

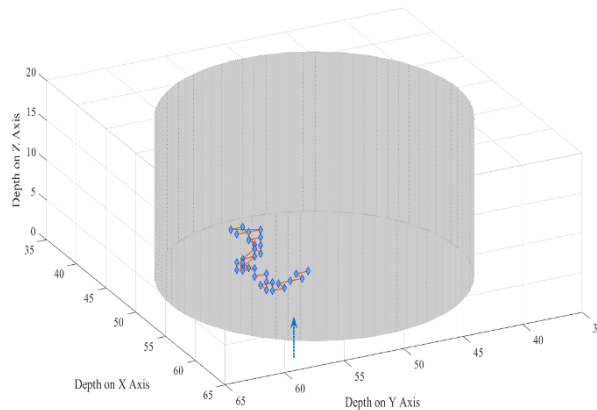
نتایج به دست آمده در جدول ۱ نشان‌دهنده تغییرات در بهره نوری در دو سوسوزن شبیه‌سازی شده، با تغییر انرژی میون از انرژی ۱۰۰ کیلو الکترون‌ولت تا ۱۲ مگا الکترون‌ولت می‌باشد. همان‌گونه که در جدول زیر قابل ملاحظه است، تا انرژی ۱۲ مگا الکترون‌ولت (MeV) بهره نوری با درصد تغییرات کمی افزایش می‌یابد و از انرژی ۱۲ MeV میزان تغییرات در بهره نوری افزایش بیشتری یافته است که این به میزان برهمکنش ذرات میون با اتم‌های بلور سوسوزن بستگی دارد.

جدول (۱). جدول تغییرات بهره نوری با افزایش انرژی باریکه میونی در سوسوزن‌های NaI(Tl) و BGO.

ردیف	انرژی میون (مگا الکترون‌ولت)	تغییرات بهره نوری در بلور NaI(Tl)	تغییرات بهره نوری در بلور BGO
۱	۰/۱	۱/۰۱	-
۲	۰/۵	۰/۹۶	-
۳	۰/۸	۰/۹۸	۰/۰۱
۴	۱	۰/۹۵	۱/۷
۵	۲	۱	۱/۸۸
۶	۴	۰/۹۹	۱/۰۳
۷	۶	۱/۱	۰/۷۶
۸	۸	۱/۱	۰/۶۴
۹	۱۰	۱/۸	۵
۱۰	۱۲	۳/۷	۵

⁴ Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

در شکل (1) یک تصویر سه‌بعدی از حرکت یک‌ذره میون در حجم کریستال سوسوزن نشان داده شده است. لازم به ذکر است این شکل (1) بعد از پردازش داده‌های حاصل از کد فلوکا در برنامه MATLAB به دست آمده است. همان‌طور که از شکل (1) مشخص است، پرتو میون از ابتدای ورود به بلور سوسوزن (از زیر بلور در این شکل (1)) شروع به اتلاف انرژی نموده است. در هر نقطه که ذره میون در بلور تغییر مسیر داده که با علامت (♦) نشان داده شده است، در این نقاط (♦) از خود انرژی خاصی به جا گذاشته که این موضوع در مواردی که انرژی جایگذاری شده در محدوده نور مرئی بوده، منجر به تولید نور مرئی در برخی برخوردها (و نه در همه برخوردها) در بلور سوسوزن شده است (در این شبیه‌سازی فقط جایگذاری انرژی در نقاطی که منجر به تولید نور مرئی شده، برنامه‌نویسی شده است). لازم به ذکر است که میزان انرژی اتلاfi نیز در هر نقطه به‌طور دقیق قابل محاسبه است. شکل (1) زیر نمایانگر تولید نور مرئی در ۳۳ نقطه محل خاص می‌باشد و در نهایت همان‌گونه که از میزان اتلاف انرژی‌ها مشخص است، این پرتو خاص با جایگذاری بخشی از انرژی خود، بدون هیچ برهمکنش دیگری از بلور خارج شده است. تعداد برهمکنش‌ها در این پژوهش به شرایط این شبیه‌سازی بستگی دارد. جهت ورود پرتو میون در راستای محور Z می‌باشد و برای بالا بردن دقت رزولوشن مکانی، محیط به $10^5 \times$ ۱۶ قسمت برابر تقسیم شده است. لازم به ذکر است استوانه‌ای که در اطراف مکان برهمکنش قرار دارد برای درک بهتر مطلب شبیه‌سازی شده است که نسبت به ابعاد بلور اصلی کوچک‌تر است.



شکل (۱). ردیابی حرکت یک پرتو میون با انرژی ۱۲ MeV در بلور سوسوزن NaI(Tl) در فضای سه‌بعدی (علامت پیکان نشانگر مسیر ورود پرتو به بلور می‌باشد) همچنین دقت اندازه‌گیری برابر 0.5 میکرومتر و دیمانسیون ابعادی برحسب میلی‌متر می‌باشد.

جدول ۲ که در زیر آورده شده است، مربوط به ۳۳ نقطه محلی است که در شکل (1) منجر به تولید فوتون‌های نوری در بلور سوسوزن شبیه‌سازی شده می‌باشد. در این جدول میزان اتلاف انرژی پرتو در هر یک از این نقاط به‌صورت جداگانه آورده شده است.

جدول (۲). جدول انرژی‌های تلف‌شده در هر برخورد توسط یک پرتو میون با انرژی ۱۲ مگا الکترون‌ولت در حجم بلور NaI(Tl).

اتلاف انرژی در هر برخورد (کیلو الکترون‌ولت)		اتلاف انرژی در هر برخورد (کیلو الکترون‌ولت)	
ردیف	اتلاف انرژی در هر برخورد (کیلو الکترون‌ولت)	ردیف	اتلاف انرژی در هر برخورد (کیلو الکترون‌ولت)
۱	۳۹۷	۱۸	۸۹
۲	۶۶	۱۹	۲۳۴
۳	۲۲۳	۲۰	۳۰
۴	۲۶۷	۲۱	۱۹
۵	۱۶۸	۲۲	۲۳۳
۶	۸۳	۲۳	۱۹۵
۷	۵۹	۲۴	۸۷
۸	۲۰۶	۲۵	۲۰۳
۹	۴۰	۲۶	۲۵۱
۱۰	۸	۲۷	۱۵۵
۱۱	۲۳۲	۲۸	۶۰
۱۲	۷۳	۲۹	۲۵۵
۱۳	۱۹۳	۳۰	۲۹۶
۱۴	۱۰۹	۳۱	۳۸۱
۱۵	۱۶۵	۳۲	۱۵۷
۱۶	۱۷۵	۳۳	۳۲۶
۱۷	۵۷	-	-

در این مطالعه، آشکارساز سوسوزن دیگری از جنس کریستال BGO نیز مدنظر قرار گرفته است و همچون آشکارساز یدور سدیم در کد فلوکا شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که در محیط شبیه‌سازی، شرایط ابعادی و مکانی BGO همانند بلور یدور سدیم است که تغییر در چگالی و شفافیت بلور سوسوزن باعث ایجاد تغییرات در بهره شده. هدف از این کار مطالعه مقایسه‌ای روی عملکرد این آشکارساز در بهره نوری و انرژی اتلافی ناشی از میون با آشکارساز سوسوزن یدور سدیم است. جدول ۳ انرژی اتلافی در هر برخورد یک‌ذره میون با انرژی ۱۲ مگا الکترون‌ولت با اتم‌های تشکیل‌دهنده بلور سوسوزن BGO را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این جدول دیده می‌شود ۳۸ برخورد اتفاق افتاده است که مقدار انرژی اتلافی در هر برخورد در مقیاس کیلو الکترون‌ولت و در محدوده ۲ تا ۲۵۰ کیلو الکترون‌ولت است.

جدول (۳). جدول انرژی‌های تلف‌شده در هر برخورد توسط یک پرتو میون بانرژی ۱۲ مگا الکترون‌ولت در حجم بلور BGO.

اتلاف انرژی در هر برخورد		اتلاف انرژی در هر برخورد	
ردیف	(کیلو الکترون‌ولت)	ردیف	(کیلو الکترون‌ولت)
۱	۱۲۹	۲۰	۲
۲	۱۳۱	۲۱	۲۳
۳	۱۳۸	۲۲	۹۴
۴	۱۰۷	۲۳	۲۳۹
۵	۲۵	۲۴	۱۷۴
۶	۱۲۳	۲۵	۱۸
۷	۱۴۴	۲۶	۵۰
۸	۱۹۷	۲۷	۱۶۸
۹	۴	۲۸	۶
۱۰	۲۵۰	۲۹	۱۳
۱۱	۱۲۶	۳۰	۱۳۸
۱۲	۱۲۴	۳۱	۱۴
۱۳	۱۲۴	۳۲	۱۶
۱۴	۱۲۶	۳۳	۱۵
۱۵	۱۷۰	۳۴	۲۱۶
۱۶	۲۰۹	۳۵	۹
۱۷	۱۳۱	۳۶	۱۱۷
۱۸	۱۵۷	۳۷	۱۶۲
۱۹	۷۱	۳۸	۱۲۹

۵. نتیجه‌گیری

این پژوهش با تمرکز روی بررسی میکرودمتری ذره میون صورت گرفت تا رفتار این ذره از لحظه ورود به آشکارساز سوسوزن از نقطه‌نظر تعداد برخوردها، انرژی اتلافی در هر برخورد، میزان بهره نوری تولیدشده و عمق نفوذ ذره ارزیابی گردد تا امکان استفاده از این نوع آشکارساز در پایش محیطی میون بررسی کمی گردد. از آنجاکه این بررسی در شرایط آزمایشگاهی و عملی امکان‌پذیر نیست، تنها با شبیه‌سازی مونت‌کارلویی توسط کدهایی که این قابلیت را دارند صورت می‌گیرد. بنابراین از کد فلوکا که در محاسبات میکرودمتری مورد تأیید می‌باشد برای انجام این تحقیق استفاده شد و تغییرات در بهره نوری در دو کریستال سوسوزن NaI(Tl) و BGO و ردیابی سه‌بعدی میون محاسبه و بررسی گردید. از دلایل مهم تمرکز روی این موضوع این بود که کارهای تحقیقاتی باهدف تمرکز روی خصوصیات فیزیکی میون و کاربردهای احتمالی آن خصوصاً در زمینه رادیوگرافی در حال گسترش است. از نتایج مهم و موردتوجه در این تحقیق، بررسی نحوه برهمکنش پرتو در آشکارساز سوسوزن بود که می‌توان تعداد، مکان و مسیر تولید فوتون‌های نور مرئی را در بلور مشاهده کرد. به‌عنوان نمونه در مکان‌هایی با مختصات (۵۰، ۵۱، ۰) و (۵۵، ۵۷، ۱۰) (در شکل (۱)) اتلاف انرژی به ترتیب ۲۲۳ و ۲۵۱ کیلو الکترون‌ولت می‌باشد. بعلاوه در این کار تحقیقاتی انرژی حاصل از جایگذاری پرتوهای میون در حجم بلور محاسبه گردید. نتایج به‌دست‌آمده شامل اتلاف انرژی هر ذره میون در تک‌تک برخوردهای آن با بلور آشکارساز سوسوزن به‌عنوان ماده هدف می‌باشد. همچنین اتلاف انرژی کل هر ذره میون نیز به‌صورت کمی به‌دست‌آمده است. این نتایج می‌تواند به شناخت دقیق‌تر برخورد میون با هر آشکارساز سوسوزن و رفتار آن پرتو در آشکارساز و تولید نور مرئی در مقیاس میکرودمتری منجر شود. بنا براین برای دانستن نحوه تولید فوتون‌ها و ردیابی آن‌ها در مقیاس میکرو، در بلور تنها راه ممکن انجام شبیه‌سازی با استفاده از کدهای شبیه‌ساز همچون کد مونت‌کارلویی فلوکا می‌باشد. همچنین این نکته قابل‌توجه است که بیشترین فوتون‌های تولیدی در نواحی ابتدایی بلور به وجود می‌آیند. جدول (۴) مقایسه

برخورد ۱۰۰ پرتو میون با انرژی ۱۲ مگا الکترون‌ولت و اتلاف انرژی آن‌ها در دو آشکارساز سوسوزن BGO و NaI(Tl) به همراه تعداد برهمکنش‌هایی که با حجم بلور انجام می‌دهند را نشان می‌دهد. به‌عنوان نمونه، از ۱۰۰ ذره میون، ۱۲ ذره در حجم حساس آشکارساز BGO برخورد داشته و بقیه یعنی ۸۸ ذره بدون هیچ برخوردی از آن عبور کرده‌اند. لازم به ذکر است هر چه تعداد برهمکنش‌ها بیشتر باشد احتمال افزایش بهره نوری نیز بالا می‌رود.

جدول (۴). تعداد برهمکنش ناشی از برخورد ۱۰۰ ذره میون با انرژی ۱۲ مگا الکترون‌ولت به‌عنوان باریکه برخوردی به دو آشکارساز سوسوزن.

ردیف	نوع سوسوزن	تعداد پرتوهایی که برخورد داشته‌اند	تعداد برهمکنش‌های ثانویه درون حجم سوسوزن
۱	BGO	۱۲	۶۰۲
۲	NaI(Tl)	۸	۶۷۱

۶. مراجع

1. G.F.Knoll. Publication. *Radiation detection and measurement*. Edition, 4th ed, 779-7780 (New York, NY: Wiley 2010).
2. L.Dobrzyński, K.W. Fornalski, LE Feinendegen, *Cancer Mortality Among People Living in Areas with Various Levels of Natural Background Radiation*, Dose-Response, **13** (3): 1-10 (2015).
3. H.H. Jolyon, LS Steven, A Wojcik, "et al", *Human exposure to high natural background radiation: what can it teach us about radiation risks?* J Radiol Prot, **29**(0): A29-A42 (2009).
4. I.V. Moskalenko, A.W. Strong, JF Ormes, MS Potgieter, *Secondary antiprotons and propagation of cosmic rays in the Galaxy and heliosphere*, The Astrophysical Journal, **565** (1): pp. 280-296 (2002).
5. S.A. Letessier, T. Stanev. *Ultra-high energy cosmic rays*, Reviews of Modern Physics, **83** (3): pp.907-942 (2011).
6. H. Seth. Neddermeyer, D Carl, P. Anderson, *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles*, Rev. **51**, 884 - Published 15 (1937).
7. G. Feinberg, S. Weinberg. *Law of Conservation of Muons*, Physical Review Letters, **6** (7): pp.381-383 (1961).
8. K.M. Hiruyaki Tanaka, *Subsurface density mapping of the earth with cosmic ray muons*, Nuclear Instrument and Methods (2003), pp. 657-669.
9. D. Carbone, *An experiment of muon-radiography at Mt Etna*, Geophys. J. Int (2014). 196, pp.633-643.
10. A. Anastasio, *The MU-RAY detector for muon radiography of volcanoes*, Nuclear Instrument and Methods. (2013). A. 732, pp. 423-426.
11. H. Cember, T.E. Johnson, *McGraw Hill Companies*, Pergamon Press. Oxford (1983).
12. A. Fasso, *The physics models of FLUKA*, status and recent development, arXiv: hep-ph/0306267, FLUKA manual (2003).
13. A. Fasso, A Ferrari, Ranft J, P.R. Sala, *FLUKA: a multi-particle transport code*, CERN. (2005).
14. V. Andersen, F. Ballarini, G. Battistoni, "et al". *The FLUKA code for space applications: recent developments*, Adv Space Res, **34**:1302-10 (2004).
15. E. Joseph, R. Nasiru, *Geometry Correction in Efficiency of a Sodium Iodide (Thallium Activated) NaI(Tl) Detector*, Pelagia Research Library, Advances in Applied Science Research, **volume 3** (2013).