



## نوترون حاصل از اندرکنش میون با آشکارساز سوسوزن پلاستیک

علی‌پور، زهرا<sup>۱</sup>، دوست محمدی، وحید<sup>۲</sup>، براتی دوین، حسین<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه زنجان، دانشکده علوم پایه، گروه فیزیک

<sup>۲</sup> دانشگاه امیر کبیر، دانشکده علوم و مهندسی انرژی

<sup>۳</sup> دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی هسته‌ای، گروه کاربرد پرتوها

### چکیده:

نوترون‌های حاصل از اندرکنش میون، منبع تابش زمینه‌ی مهمی در آشکارسازها هستند. نوترون‌های تولید شده در آشکارساز سوسوزن پلاستیک حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون و واکنش *photo-nuclear* با استفاده از کد *MCNPX* شبیه‌سازی شد و طیف انرژی و شدت نوترون‌های تولید شده مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهد، شدت نوترون‌های حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون با آشکارساز سوسوزن پلاستیک بیشتر از نوترون‌های حاصل از واکنش *photo-nuclear* است و انرژی نوترون‌های حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون در آشکارساز سوسوزن پلاستیک تا  $43 \text{ MeV}$  می‌باشد.

**کلید واژه:** نوترون، میون، اندرکنش هسته‌ای، واکنش *photo-nuclear* سوسوزن پلاستیک، *MCNPX*

### *Muon induced neutron in the plastic scintillator detector*

Alipoor, Zahra<sup>1</sup>; Doostmohammadi<sup>2</sup>, Vahid; Barati, Hossein<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Physics, University of Zanjan, Zanjan

<sup>2</sup> Department of Energy Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology, Tehran

<sup>3</sup> Department of Radiation Application, Shahid Beheshti University, Tehran

#### **Abstract:**

*Muon induced neutrons are important background sources in the detectors. Using MCNPX code, the neutron production via nuclear interaction of muon and photo-nuclear reaction was simulated in the plastic scintillator detector. The energy spectrum and intensity of the produced neutrons were obtained. The results show that the intensity of neutron via muon nuclear interaction is higher than neutrons from photo-nuclear reaction and also muon nuclear interaction can produce neutron with energy up to 43 MeV in the plastic scintillator detector.*

**Keywords:** Neutron, Muon, Nuclear interaction, photo-nuclear reaction, plastic scintillator, MCNPX

مقدمه:



پرتو میون کیهانی از طریق اندرکنش پرتوهای کیهانی، که اغلب پروتون هستند، در اتمسفر زمین تولید می‌شود. میون یک لپتون با عمر متوسط  $2.1969 \mu\text{s}$  و جرم  $105.6583 \text{ MeV}/c^2$  است. واپاشی میون  $\mu^+$  منجر به تولید پوزیترون، نوترینو الکترونی و آنتی نوترینو میونی و واپاشی  $\mu^-$  منجر به تولید الکترون، آنتی نوترینو الکترونی و نوترینو میونی می‌شود [۳۸]. نوترون‌های حاصل از میون به عنوان منبع تابش زمینه مهم هستند. این نوترون‌ها ناشی از فرآیندهای زیر می‌باشند [۴]:

۱- واپاشی رادیوایزوتوپ‌های اکتیو همچون  $^9\text{Li}$  و  $^8\text{He}$  که در اثر اندرکنش میون با هسته تولید می‌شوند

۲- پراکندگی الاستیک میون با نوترون‌های هسته

۳- اندرکنش photo-nuclear ناشی از آبخار الکترومغناطیس بوجود آمده از میون

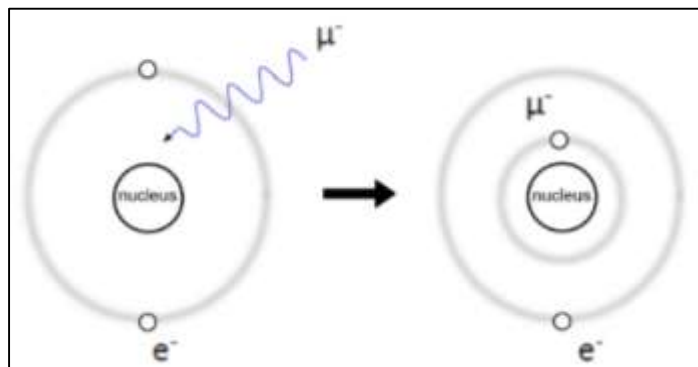
۴- نوترون‌های ثانویه حاصل از نوترون‌های فرآیندهای ذکر شده

غالباً آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک و یا سوسوزن مایع نظیر آشکارسازی آنتی نوترینو، به عنوان محیط آشکارسازی استفاده می‌شوند [۳۹]. همچنین در سیستم‌های پایش مواد رادیواکتیو، به دلیل مقرون به صرفه بودن و قابلیت بکارگیری در ابعاد بزرگ، از آشکارسازهای سوسوزن پلاستیک استفاده می‌گردد [۴۰].

میون‌های منفی که در سوسوزن پلاستیک متوقف می‌شوند، می‌توانند همانند الکترون‌ها مقید اتم‌های هیدروژن و کربن شوند. از آنجاییکه میون، الکترون نیست، اصل طرد پائولی اجازه اشغال مدار اتمی که الکترون پر کرده را نمی‌دهد [۴۱]. میون منفی با ورود به اتم، مدار اوربیتال الکترون اطراف هسته را اشغال می‌کند. به دلیل اینکه میون سنگین‌تر از الکترون است، قطر مدار آن کوچک‌تر از قطر مدار الکترون می‌باشد و در مدار منحصر به خود قرار می‌گیرد و در هسته گیراندازی می‌شود.

این میون‌های منفی مقید، می‌توانند پیش از واپاشی، از طریق واکنش زیر با پروتون‌ها اندرکنش کنند. از آنجاییکه میون‌های منفی از دو طریق واپاشی و اندرکنش با پروتون، نابود می‌شوند، عمر آنها از میون‌های مثبت که اندرکنش با پروتون ندارد، کمتر است. در شکل ۱، شماتیک اتم میونی نشان داده شده است.

در رابطه (۱)، میون منفی در هسته با پروتون اندرکنش می‌کند و نوترون و نوترینوی میون گسیل می‌شود. در رابطه‌های (۲) و (۳) میون منفی با هسته اندرکنش می‌کند و هسته برانگیخته می‌گردد و یک نوترینوی میون گسیل می‌گردد. هسته برانگیخته پروتون، نوترون و سایر ذرات را گسیل می‌نماید [۴۱].



شکل ۱. شماتیک اتم میونی.

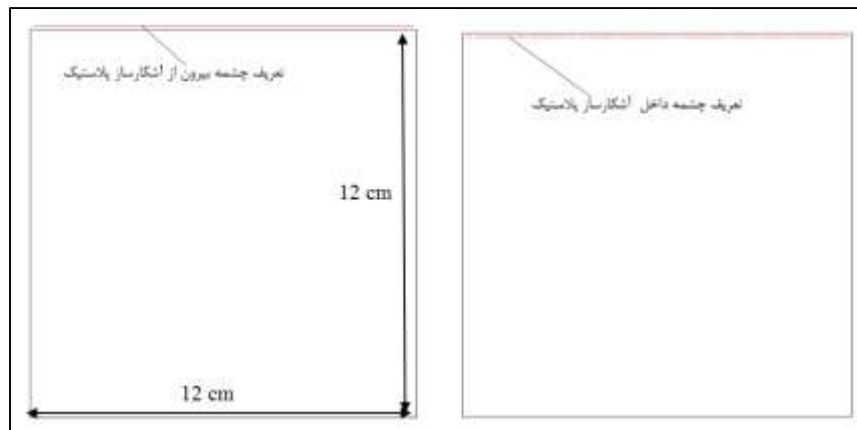
چنانچه میون واپاشی نماید، الکترون حاصل از واپاشی که دارای حداکثر انرژی  $53\text{MeV}$  بوده [۱] و الکترون‌های حاصل از یونش میون در محیط آشکارساز، می‌توانند سبب اندرکنش photo-nuclear گردند. در این تحقیق نوترون‌های حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون و photo-nuclear مورد بررسی قرار می‌گیرد.

### روش کار:

به منظور بررسی اندرکنش میون و ذرات حاصل از واپاشی میون با آشکارساز سوسوزن پلاستیک، چشمه میون با انرژی  $1\text{keV}$  در فاصله بسیار کم، بیرون از آشکارساز سوسوزن پلاستیک با ابعاد  $15\text{cm} \times 12\text{cm} \times 12\text{cm}$  تعریف شد تا ذرات ثانویه بوجود آمده تا حد ممکن ذرات حاصل از واپاشی میون باشند و در حالت بعد چشمه میون در فاصله  $0.1\text{mm}$  از لبه آشکارساز سوسوزن پلاستیک و درون آن تعریف شد. در هر ورودی در کارت فیزیک فوتون، بخش photo-nuclear در دو حالت فعال و غیر فعال بررسی شد. طیف انرژی نوترون حاصل از اندرکنش میون با پلاستیک با استفاده از تالی F4، محاسبه شد. در شکل ۲ هندسه شبیه‌سازی شده برای بررسی میون  $1\text{keV}$  مشاهده می‌شود.



در مرحله بعد، ابعاد آشکارساز  $15\text{ cm} \times 100\text{ cm} \times 12\text{ cm}$  در نظر گرفته شد. بطوریکه میون از  $100\text{ cm}$  آشکارساز عبور می‌کند. شبیه‌سازی‌ها برای دو حالت فعال و غیرفعال بودن بخش photo-nuclear در کارت فیزیک فوتون انجام شد و نوترون حاصل از عبور میون با انرژی  $100\text{ MeV}$  و  $200\text{ MeV}$  از این آشکارساز محاسبه شد.



شکل ۲. هندسه شبیه‌سازی شده بر اساس تعریف مکان چشمه میون

### نتایج:

در جدول ۱ وقایع مختلف برای یک ذره میون با انرژی  $1\text{ keV}$  هنگام عبور از یک آشکارساز به ابعاد  $15\text{ cm} \times 12\text{ cm}$  مشاهده می‌شود. اعداد ذکر شده در جداول مربوط به اتلاف و تولید ذرات، به ازای یک ذره فرودی میون می‌باشد.

جدول ۱. اتلاف میون  $1\text{ keV}$  در آشکارساز سوسوزن پلاستیک به ضخامت  $12\text{ cm}$

از دست رفتن میون (به ازای یک ذره چشمه)				
چشمه میون بیرون آشکارساز		چشمه میون داخل آشکارساز		
انرژی (MeV)	وزنی	انرژی (MeV)	وزنی	
۰	۰	$6.3784 \times 10^{-5}$	$6.3784 \times 10^{-2}$	اندرکنش هسته‌ای
$10^{-1} \times 1$	۱	$9.3622 \times 10^{-4}$	$9.3622 \times 10^{-1}$	وآپاشی ذره



مطابق جدول فوق، در حالتیکه چشمه میون بیرون از آشکارساز قرار دارد، میون با آشکارساز اندرکنش نداشته و تنها واپاشی می‌نماید. در جدول ۲ اندرکنش‌هایی ذکر شده است که منجر به تولید نوترون در اثر اندرکنش میون کم انرژی با آشکارساز می‌شوند. این نتایج برای دو حالت تعریف چشمه در بیرون و داخل سوسوزن پلاستیک می‌باشند.

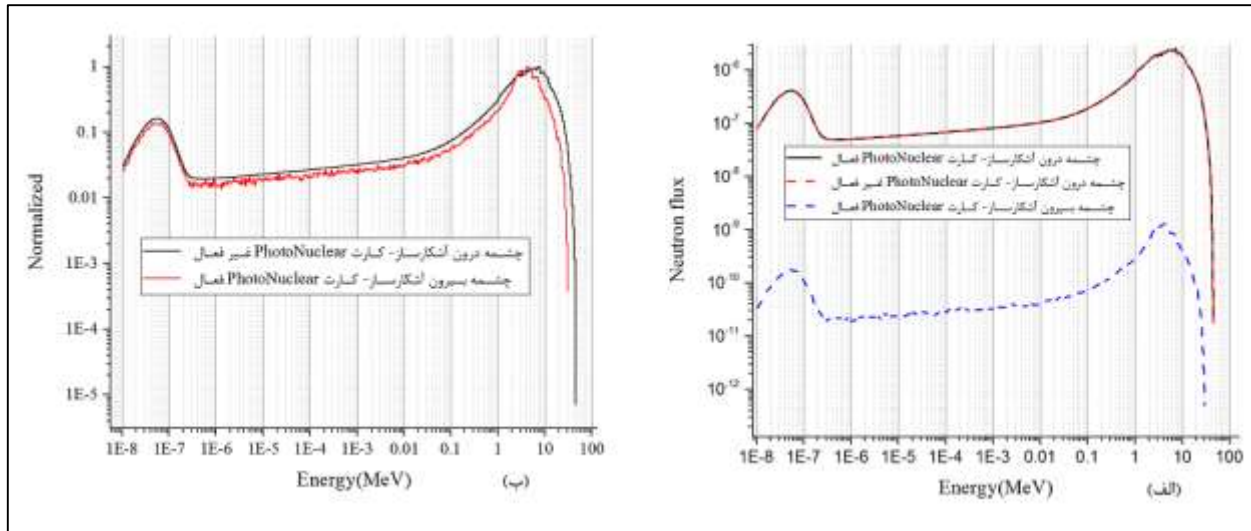
با توجه به جدول ۲، در حالتیکه چشمه بیرون از آشکارساز قرار دارد، تمامی نوترون‌ها، حاصل از photo-nuclear می‌باشد. در صورت غیر فعال بودن بخش photo-nuclear فیزیک فوتون، نوترونی تولید نمی‌گردد.

جدول ۲. تولید نوترون حاصل از واپاشی و اندرکنش میون ۱ keV با آشکارساز سوسوزن پلاستیک

تولید نوترون (به ازای یک ذره چشمه)				
چشمه میون بیرون آشکارساز		چشمه میون داخل آشکارساز		
کارت Photonuclear غیر فعال	کارت Photonuclear فعال	کارت Photonuclear غیر فعال	کارت Photonuclear فعال	
۰	$9/1667 \times 10^{-9}$	$6/6485 \times 10^{-2}$	$6/6485 \times 10^{-2}$	اندرکنش هسته‌ای
۰	$1/4447 \times 10^{-5}$	۰	$1/4286 \times 10^{-5}$	Photonuclear

در شکل ۳ الف، طیف انرژی نوترون تولید شده حاصل از اندرکنش و واپاشی میون ۱ keV با آشکارساز پلاستیک مشاهده می‌شود. وقتی چشمه میون داخل آشکارساز تعریف می‌شود، تفاوت چندانی بین نوترون تولید شده در حالتی از شبیه‌سازی که کارت photo-nuclear فعال یا غیر فعال است مشاهده نمی‌شود. زیرا مطابق نتایج ذکر شده در جدول ۲، میزان نوترون حاصل از اندرکنش هسته‌ای، حدود هزار برابر نوترون حاصل از photo-nuclear می‌باشد. همچنین مطابق شکل ۳ الف و جدول ۲، وقتی چشمه میون بیرون آشکارساز باشد و کارت photo-nuclear غیر فعال باشد هیچ نوترونی تولید نخواهد شد.

تفاوت بین نوترون حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون با آشکارساز و نوترون حاصل از photonuclear، در شکل ۳ ب، رسم شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد، طیف انرژی نوترون حاصل از اندرکنش هسته‌ای، دارای انرژی بیشتری نسبت به طیف انرژی نوترون حاصل از photo-nuclear می‌باشد.



شکل ۳. نوترون حاصل از میون ۱ keV در آشکارساز سوسوزن پلاستیک: الف. طیف انرژی نوترون در حالت مختلف شبیه‌سازی. ب. مقایسه طیف نوترون حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون و photo-nuclear

در جدول ۳ وقایع مختلف برای میون با انرژی ۱۰۰ MeV و ۲۰۰ MeV هنگام عبور از آشکارساز ذکر شده است. مطابق جدول، میون‌های با انرژی ۱۰۰ MeV، نسبت به میون‌های ۲۰۰ MeV، فرار کمتری داشته و در نتیجه اندرکنش و واپاشی آن‌ها در آشکارساز بیشتر خواهد بود.

جدول ۳. ائتلاف میون در آشکارساز سوسوزن پلاستیک به ضخامت ۱۰۰ cm

از دست رفتن میون (به ازای یک ذره چشمه)				
۲۰۰ MeV		۱۰۰ MeV		
انرژی (MeV)	وزنی	انرژی (MeV)	وزنی	
۴۲٫۴۲۳	$۴/۶۴۳۷ \times 10^{-10}$	۱۰/۲۸۲	$۲/۱۵۴۳ \times 10^{-10}$	فرار
$۳/۸۳۷۶ \times 10^{-10}$	$۳/۴۰۷۹ \times 10^{-10}$	$۵/۶۲۸۲ \times 10^{-10}$	$۴/۹۹۸ \times 10^{-10}$	اندرکنش هسته‌ای
$۱/۶۹۳۷ \times 10^{-10}$	$۵/۰۱۵۵ \times 10^{-10}$	$۱/۲۶۶۱ \times 10^{-10}$	$۷/۳۴۵۹ \times 10^{-10}$	واپاشی ذره

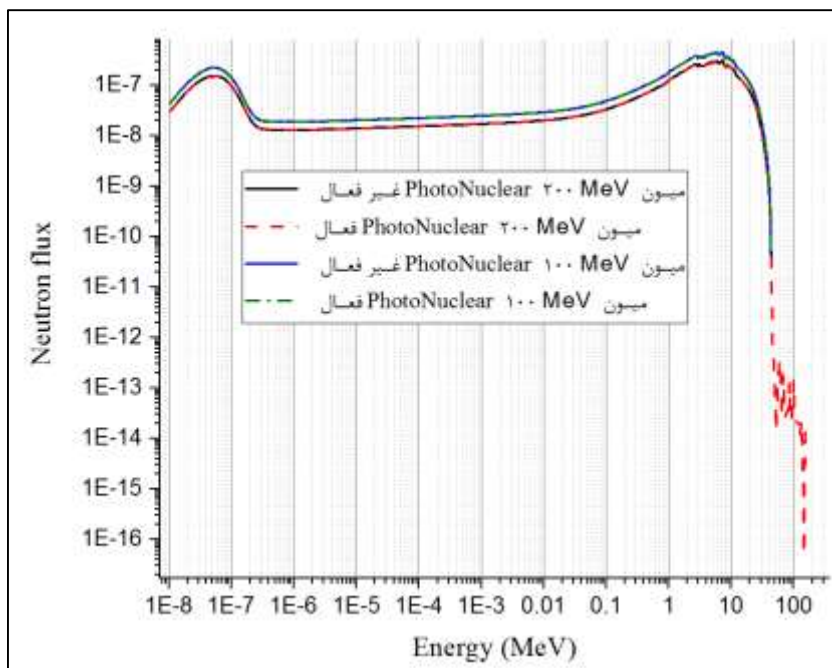


در جدول ۴ میزان تولید نوترون حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون و photo-nuclear برای دو انرژی ۱۰۰ MeV و ۲۰۰ MeV ذکر شده است. مشاهده می‌گردد، سهم photo-nuclear، در تولید نوترون نسبت به اندرکنش هسته‌ای بسیار کم می‌باشد.

جدول ۴. تولید نوترون حاصل از واپاشی و اندرکنش میون در آشکارساز سوسوزن پلاستیک

تولید نوترون (به ازای یک ذره چشمه)				
۲۰۰ MeV		۱۰۰ MeV		
کارت Photonuclear غیر فعال	کارت Photonuclear فعال	کارت Photonuclear غیر فعال	کارت Photonuclear فعال	
$3/559 \times 10^{-2}$	$3/559 \times 10^{-1}$	$5/2205 \times 10^{-2}$	$5/2205 \times 10^{-1}$	اندرکنش هسته‌ای
۰	$1/9693 \times 10^{-5}$	۰	$2/8809 \times 10^{-5}$	Photonuclear

در شکل ۴ طیف انرژی نوترون حاصل از اندرکنش و واپاشی میون با انرژی ۱۰۰ MeV و ۲۰۰ MeV در آشکارساز پلاستیک مشاهده می‌شود. در این شکل نتایج بدست آمده برای طیف انرژی نوترون بر اساس دو حالت فعال و غیر فعال بودن photo-nuclear رسم شده است.



شکل ۴: طیف انرژی نوترون حاصل از واپاشی و اندرکنش میون با ۱۰۰ cm آشکارساز سوسوزن پلاستیک

### نتیجه گیری:

بر اساس نتایج جدول ۱، وقتی میون کم انرژی از بیرون آشکارساز به سمت آشکارساز حرکت می‌کند، به دلیل انرژی بسیار پایین، فقط واپاشی می‌کند و ذرات حاصل از واپاشی وارد آشکارساز می‌شود. اما وقتی چشمه میون در داخل آشکارساز تعریف شود، میون علاوه بر واپاشی، با آشکارساز اندرکنش می‌کند و بخشی از اتلاف میون مربوط به اندرکنش هسته‌ای می‌باشد. بر اساس جدول ۲، در حالتیکه که میون از بیرون آشکارساز وارد آن می‌شود و فقط واپاشی می‌کند، واکنش photo-nuclear منبع اصلی تولید نوترون خواهد بود و چنانچه در این حالت در ورودی MCNP کارت photo-nuclear در حالت off باشد هیچ نوترونی تولید نخواهد شد. در حالتیکه چشمه میون در داخل آشکارساز تعریف شود، با وجود آنکه حدود ۹۳ درصد میون واپاشی انجام می‌دهد، ۶ درصد از میون‌هایی که اندرکنش هسته‌ای انجام می‌دهند، منبع اصلی تولید نوترون هستند. این تفاوت در مقدار نوترون تولید شده در شکل ۳ به خوبی قابل مشاهده است.

با توجه به جدول ۳ بخشی از میون‌ها به دلیل انرژی بالا بدون هیچ اندرکنش هسته‌ای یا واپاشی از آشکارساز فرار می‌کنند. با افزایش انرژی میون، درصد میون‌هایی که هنگام عبور از آشکارساز به مرحله واپاشی می‌رسند و همچنین درصد میون‌هایی





که با آشکارساز اندرکنش هسته‌ای انجام می‌دهند، کاهش می‌یابد. با مقایسه جدول ۳ و جدول ۴، مشاهده می‌شود درصد نوترون‌های تولید شده از میون با انرژی  $100 \text{ MeV}$  بیشتر از نوترون‌های حاصل از میون با انرژی  $200 \text{ MeV}$  خواهد بود. زیرا درصد احتمال اندرکنش هسته‌ای میون با انرژی  $100 \text{ MeV}$  بیشتر است.

می‌توان بر اساس طیف انرژی نوترون محاسبه شده، دریافت که طیف انرژی نوترون حاصل از اندرکنش هسته‌ای میون با آشکارساز تا انرژی  $43 \text{ MeV}$  می‌باشد. این محاسبات با فرض عدم وجود سایر مواد در اطراف آشکارساز انجام شده است. چنانچه اندازه‌گیری در محیط آزمایشگاهی صورت گیرد، لازم است اندرکنش میون با مواد مورد مطالعه قرار گرفته و طیف انرژی و شار نوترون حاصل از میون بررسی شود.

#### منابع:

1. Benjamin Brau, Christopher May, Robert Ormond, and John Essick, Determining the muon mass in an instructional laboratory, American Journal of Physics 78, 64 (2010).
  2. Istvan Bikit, Dusan Mrdja, Kristina Bikit, Jaroslav Slivka, Nikola Jovancevic, L'aszl'o Ol'ah, Gerg'o Hamar and Dezs'o Varga, Novel approach to imaging by cosmic-ray muons, A letters journal exploring the frontiers or physics, 113(2016).
  3. Matthew Bressler, Lydia Goodwin, and Abaz Kryemadhi Cosmic ray topography, American Journal of Physics, 85, 840 (2017).
  4. Li Dengjie, Cosmic Muon Induced Backgrounds in the Daya Bay Reactor Neutrino Experiment, International Journal of Modern Physics, 2017.
  5. M.Battaglieri, et al., "An anti-neutrino detector to monitor nuclear reactor's power and fuel composition", Nuclear Instruments and Methods A 617 (2010) 209-213.
  6. Y. Kuroda, et al., "A mobile antineutrino detector with plastic scintillators", Nuclear Instruments and Methods A 690 (2012) 41-47.
  7. Danielle Norcini, "Development of PROSPECT detectors for precision antineutrino studies" PROSPECT collaboration at DPF 2015: 5 August 2015.
  8. D. V. Jordan, et al., "Advanced large-area plastic scintillator project (ALPS): Final report, PNNL-(7305)-July 2007.
  9. Lodovico Lappetito, "PMT coupled Plastic Scintillator for Cosmic Muons Detection", RilevatoreMuoni\_ENG - 18/11/2015
  10. Suguru Tamamushi, "Lifetime of Positive and Negative Muons in Matter", August 14, 2014.
۱۱. حسین براتی دوین؛ وحید دوست محمدی؛ زهرا علی‌پور، اندازه‌گیری عمر میون و طیف انرژی الکترون حاصل از واپاشی میون، کنفرانس فیزیک ۱۳۹۷.