



تعیین نسبت بار میونی با داده‌های شبیه‌سازی شده با کد کورسیکا

فضلعلیزاده، مائده* (۱) - بهمن آبادی، محمود (۲) -

(۱) - مرکز تحصیلات تکمیلی پیام نور تهران، گروه فیزیک

(۲) - دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده فیزیک، گروه فیزیک

چکیده:

با استفاده از کد شبیه‌سازی کورسیکا در ۲۱ حالت انرژی، در بازه 1GeV تا 900GeV و در هر حالت ۲۰۰۰۰ بهمن هوایی (۸۸٪ با ذره اولیه پروتون و ۱۲٪ با ذره اولیه هلیوم) ساخته شده و زاویه سرسویی و سمتی ذره اولیه به ترتیب بین ۰ تا ۶۰ و ۰ تا ۳۶۰ درجه زنوم انتخاب شده است. این شبیه‌سازی‌ها برای سطح مشاهده تهران و با دو مدل $GHEISHA$ و $UrQMD$ برای برهمکنش‌های هادرونی در انرژی پایین و مدل $QGSJET-II$ برای برهمکنش‌های انرژی بالا انجام گرفته است. با استفاده از میون‌های مثبت و منفی تولید شده در این بهمن‌ها، نسبت بار میونی در زوایای مختلف و انرژی‌های متفاوت به دست آمد که یک ناهمسانگردی شرقی-غربی برای این نسبت دیده می‌شود.

کلمات کلیدی: *CORSIKA, Extensive Air Shower, Muon, Muon Charge Ratio, Anisotropy*

مقدمه:

میون‌ها یکی از طعم‌های لپتون‌ها هستند که انرژی سکون آنها حدود 106MeV و نیمه عمرشان $2.2\mu\text{s}$ است. نسبت تعداد میون‌های جوی مثبت به منفی که به سطح زمین می‌رسند به عنوان نسبت بار میونی، R_μ ، شناخته می‌شود. نسبت بار میونی مثبت به منفی، $R_\mu = \frac{n_+}{n_-}$ ، اطلاعات مهمی از شار نوترینوهای جوی و برهمکنش‌های هادرونی به ما می‌دهد. در محدوده میون‌های کم انرژی (حدود 1GeV) شار میونی منبع مهمی برای تولید الکترون، نوترینو و آنتی نوترینوی میونی است و نسبت تعداد میون‌های مثبت به منفی به طور مستقیم با تعداد نوترینو به آنتی نوترینوی الکترونی رابطه دارد. از آنجا که برهمکنش میون‌های مثبت و منفی با ماده یکسان نیست، لذا یافتن نسبت بار میونی برای پاسخ آشکارسازهای نوترینو پراهمیت خواهد بود. به طور نوعی میون‌های مثبت و منفی و نوترینوها و آنتی نوترینوهای وابسته از واپاشی‌های زیر در اتمسفر تولید می‌شوند:

$$\begin{aligned} A_{CR} + A_{Air} &\rightarrow \pi^\pm + \pi^0 + K^\pm + \text{other hadrons}, \\ \left\{ \begin{array}{l} \pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu); \sim 100\%, \tau_0 = 26\text{ns} \\ \mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_\mu(\nu_\mu) \end{array} \right. \end{aligned}$$



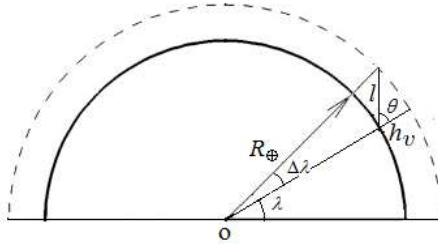
$$\begin{cases} K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu_{\mu}(\bar{\nu}_{\mu}); \sim 63.5\%, \tau_0 = 12ns \\ \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm} + \nu_e(\bar{\nu}_e) + \bar{\nu}_{\mu}(\nu_{\mu}) \end{cases}$$

که در آن $K^{\pm}, \pi^0, \pi^{\pm}, A_{Air}, A_{CR}$ به ترتیب یک پرتوی کیهانی (مانند پروتون، آلفا و کربن)، یک هسته هوایی، پایون‌ها و کائون‌ها را توصیف می‌کنند. با توجه به این واپاشی‌ها انتظار می‌رود نسبت نوترینوی میونی به نوترینوی الکترونی ۲ باشد. اما نتایج آزمایش‌های Super-Kamiokande عدد کوچکتري برای این نسبت نشان می‌دهد که این رفتار غیر عادی بر اساس نوسان‌های نوترینو قابل توصیف است [۱]. میون‌هایی که به سطوح پایین می‌رسند اساساً در ارتفاعات بالا تولید شده‌اند. میون‌ها بر اثر برهمکنش‌های جوی انرژی خود را حدوداً به میزان $\frac{dE_{\mu}}{dX} = -2\text{MeV}/(\text{gcm}^{-2})$ از دست می‌دهند. با توجه به اثرات نسبیتی، میونی با انرژی ۱ GeV (یعنی با فاکتور لورنتز $\gamma=9.5$) در چارچوب مرجع ناظر زمینی، نیمه عمر $\gamma\tau_0 = 21\mu s$ دارد. بنابراین می‌تواند از ارتفاع بیش از $h = (\gamma-1)^{1/2} c\tau_0 \approx 6.2\text{km}$ به سطح زمین برسد ولی به دلیل کاهش ناشی از یونیزاسیون این ارتفاع به حدود ۳ km کاهش می‌یابد. در نتیجه انرژی میون‌ها در سطح تهران تابعی مرکب از طیف تولید آنها، کاهش انرژی آنها در جو و واپاشی خواهد بود.

در این بررسی میون‌های مثبت و منفی تولید شده از ذرات اولیه‌ای که ۸۸٪ آنها پروتون و ۱۲٪ آنها هلیوم است در ۲۱ حالت مختلف بین ۷ GeV تا ۹۰۰ GeV، به طور جداگانه در هر انرژی مشخص شده‌اند. نسبت بار میونی برای هر انرژی اولیه محاسبه شده و از آنجا که تقسیم بندی‌های انرژی به صورت شبه لگاریتمی انتخاب شده است، مقدار متوسط نسبت بار میونی با وزن دهی با تابع $E^{-1/\Delta} \Delta(\log E)$ محاسبه می‌گردد. با این کار نسبت بار میونی به دست آمده وابستگی به انرژی میون‌ها نخواهد داشت. ضمناً اثر شرقی غربی نسبت بار میونی در بهمن‌هایی با ذرات اولیه با انرژی‌های مختلف نیز مطالعه می‌شود.

بهمن‌های هوایی تولید شده با کد کورسیکا:

برنامه کورسیکا برای شبیه‌سازی بهمن‌های گسترده هوایی به کار گرفته می‌شود و ذره اولیه آن می‌تواند پروتون، آلفا و دیگر هسته‌های اتمی باشد [۲]. مدل‌های مختلف برهمکنش‌های هادرونی در این برنامه در دسترس هستند. مدل کیوجی-اس جت ۲ برای برهمکنش‌های هادرونی با انرژی بیش از $E_{lab} = 80\text{GeV}$ و مدل‌های گیشا و یوآرکیوام‌دی برای انرژی‌های کمتر از ۸۰ GeV استفاده می‌شود. این شبیه‌سازی‌ها در سطح مشاهده تهران (N ۳۵° ۴۳' و E ۵۱° ۲۰'، $m 897\text{gcm}^{-2}$) انجام شده که مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در این مکان $B_x = 27.97\mu T$ و $B_z = 39.45\mu T$ هستند.



شکل شماره (۱) نمایش ارتفاع عمودی جو، زاویه سرسویی و دیگر پارامترهای به کار رفته در متن.

فرض می‌کنیم میدان مغناطیسی زمین ثابت و مستقل از جهت زاویه‌ای ورود میون است. برای توصیف این فرض شکل ۱ را در نظر بگیرید. ارتفاع عمودی جو، h_v ، به شکل ساده به صورت زیر توصیف می‌شود:

$$(۱) \quad h_v \approx l \cos \theta + \frac{l^2}{2R_{\oplus}} \sin^2 \theta, \quad (l/R_{\oplus} \ll 1)$$

که l ، θ و R_{\oplus} به ترتیب طول شیب مسیر، زاویه سرسویی و شعاع زمین هستند. برای زوایای $\theta < 60^\circ$ از جمله دوم در معادله بالا می‌توان چشمپوشی کرد. عرض جغرافیایی سطح مشاهده λ است. تغییرات عرض جغرافیایی میون از نقطه شروع تا پایان مسیر، $\Delta\lambda$ ، بر حسب زاویه سرسویی θ توسط رابطه زیر داده می‌شود:

$$(۲) \quad \sin \Delta\lambda = \frac{l}{h_v + R_{\oplus}} \sin \theta$$

توزیع زاویه سرسویی میون‌ها با رابطه $\frac{dl}{dt} = 2\pi I_0 \sin \theta \cos^2 \theta$ بیان می‌شود [۳]. متوسط زاویه سرسویی بین 0° و 60°

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^{\pi/3} \theta \cos^2 \theta \sin \theta d\theta}{\int_0^{\pi/3} \cos^2 \theta \sin \theta d\theta} = \frac{9\sqrt{3}-\pi}{21} \text{ rad} \approx 34^\circ$$

تقریباً 34° است:

با تقریب $l \approx h_v / \cos \theta$ برای $\theta = 34^\circ$ ، $h_v \approx 20 \text{ km}$ و $R_{\oplus} = 6400 \text{ km}$ ؛ $\Delta\lambda \approx 1^\circ$ به دست می‌آید. با این مقدار $\Delta\lambda$ ، تغییر نسبی مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین در محل تهران محاسبه می‌شود. با تقریب دو قطبی برای میدان مغناطیسی زمین، $B_x = (k/r^3) \cos \lambda$ و $B_z = (-2k/r^3) \sin \lambda$ که $k \approx 10^{10} \text{ Tm}^3$ است، تغییرات به صورت $\left| \frac{\Delta B_x}{B_x} \right| = 0.01$ و $\left| \frac{\Delta B_z}{B_z} \right| = 0.02$ به دست می‌آید. در میدان مغناطیسی کل نیز حاصل به صورت $\Delta B = [(B_x \Delta B_x)^2 + (B_z \Delta B_z)^2]^{1/2} / B \approx 0.07 \mu\text{T}$ می‌شود. پس با خطای بسیار کوچکی می‌توان میدان مغناطیسی زمین را یکنواخت در نظر گرفت.

از آنجا که تولید میون‌های بالای 0.3 GeV (حد پایین انرژی قطع میون‌ها در کورسیکا) در سطح مشاهده تهران از انرژی 7 GeV برای ذرات اولیه شروع می‌شود، برای یافتن طیف میون‌ها و برای تعیین نسبت بار میونی نقطه شروع انرژی ذره اولیه 7 GeV انتخاب شده است. در این شبیه‌سازی انرژی ذرات اولیه در ۲۱ حالت مجزا بین 7 GeV تا 90.0 GeV در نظر گرفته می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی و روش آنالیز :

الف. جهت و طیف انرژی میون‌ها

محورهای مختصات در برنامه کورسیکا به صورت شکل ۲ تعریف می‌شوند. با استفاده از مؤلفه‌های اندازه حرکت میون‌های به دست آمده در خروجی داده‌های شبیه‌سازی شده، زوایای سروسویی و سمتی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

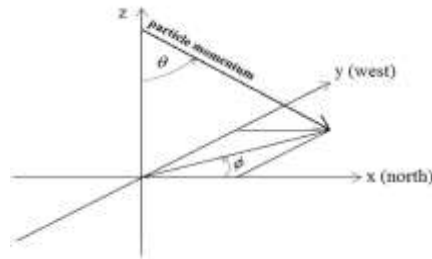
$$(۳) \quad \cos \theta = \frac{p_z}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}}, \quad \sin \phi = \frac{p_y}{\sqrt{p_x^2 + p_y^2}}$$

انرژی هر میون نیز از اندازه حرکت آن به دست می‌آید: $E_\mu = (p^2 c^2 + m_0^2 c^4)^{1/2}$. طیف انرژی میون‌های تولید شده با شرایط مذکور، در شکل ۳ نشان داده می‌شود. این توزیع‌ها با تابع زیر برازش می‌شوند [۵]:

$$(۴) \quad \frac{dN(E_\mu)}{dE_\mu} = A(E_0 + E_\mu)^{-\gamma}$$

پارامترهای برازش تابع برای سطح مشاهده تهران به صورت $A = (1.1 \pm 0.4) \times 10^3 (\text{GeV})^{-1}$ و $\gamma = (2.7 \pm 0.2)$ و $E_0 = (2.4 \pm 0.2)$ GeV و (3.5 ± 0.3) است که مقادیر اول در هر پیرانتز مربوط به مدل کیوجی اس جت - گیشا و مقادیر دوم مربوط به مدل کیوجی اس جت - یوآرکیوادی است. شیب این طیف‌ها در انرژی کمتر از ۱ GeV تقریباً صاف است و به تدریج افزایش می‌یابد.

ب.



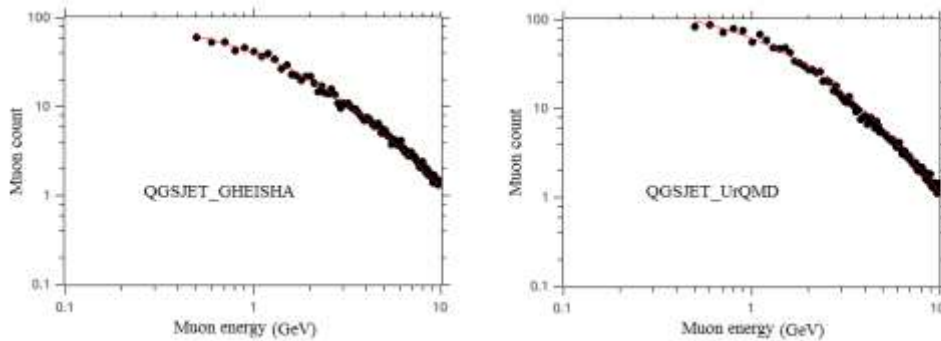
شکل شماره (۲) سیستم مختصات تعریف شده در برنامه شبیه‌سازی کورسیکا.

بستگی نسبت بار میونی به انرژی ذره اولیه

تعداد میون‌های مثبت و منفی در هر یک از ۲۱ حالت انرژی ذره اولیه، به طور جداگانه با دو مدل کیوجی اس جت - گیشا و کیوجی اس جت - یوآرکیوادی به دست می‌آید و نسبت بار میونی، $R_\mu = \frac{n_+}{n_-}$ برای هر یک محاسبه می‌شود. با توجه به اینکه طیف انرژی ذرات اولیه با $dN/dE \propto E^{-2.7}$ متناسب است و از آنجا که تقسیم بندی‌های انرژی انتخابی ما در شبیه‌سازی خطی نبوده و به صورت شبه لگاریتمی است، مقادیر متوسط \bar{n}_\pm از رابطه $\bar{n}_\pm = \frac{\sum_{i=1}^{21} n_{\pm i} E_i^{-1.7} \Delta(\log E_i)}{\sum_{i=1}^{21} E_i^{-1.7} \Delta(\log E_i)}$ و انحراف معیار آن به صورت $(n_+^2 n_- + n_-^2 n_+)^{1/2} / \bar{n}_\pm$ محاسبه می‌شود.



در این مسیر مقادیر متوسط (\bar{n}_-, \bar{n}_+) بدون هیچ ملاحظه‌ای بر انرژی میون‌ها برای دو مجموعه مدل‌های کیوجی اس‌جت-گیشا و کیوجی اس‌جت-یوآرکیوآمدی به ترتیب $(۱۳۸۹$ و $۱۶۳۴)$ و $(۱۷۵۸$ و $۱۵۱۷)$ هستند. بنابراین مقادیر متوسط نسبت بار میونی برای این دو مدل به ترتیب $۱٫۱۸ \pm ۰٫۰۴$ و $۱٫۱۶ \pm ۰٫۰۴$ خواهد بود.

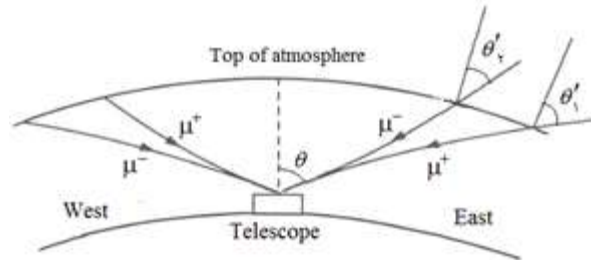


شکل شماره (۳) طیف انرژی میون‌ها در سطح مشاهده تهران در دو مدل ارائه شده.

دیده می‌شود که پیشگویی مدل کیوجی اس‌جت-گیشا با نتایج تجربی سازگارتر است [۳ و ۴]. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که در ذرات اولیه‌ای با انرژی کمتر از ۵۰ GeV ، مدل یوآرکیوآمدی تعداد میون‌های مثبت و منفی بیشتری در مقایسه با مدل گیشا تولید می‌کند و این موضوع در انرژی‌های بالاتر برعکس می‌شود. تقریباً در همه انرژی‌های اولیه نسبت بار میونی در مدل گیشا بیشتر از یوآرکیوآمدی است. این موضوع نشان می‌دهد که مدل گیشا به تولید میون‌های مثبت حساسیت بیشتری دارد. مقادیر متوسط نسبت بار میونی برای دو مدل کیوجی اس‌جت-گیشا و کیوجی اس‌جت-یوآرکیوآمدی به ترتیب $۱٫۱۸ \pm ۰٫۰۴$ و $۱٫۱۶ \pm ۰٫۰۴$ است که یک اختلاف نسبی حدود ۲٪ بین دو مدل گیشا و یوآرکیوآمدی نشان می‌دهد.

ج. ناهمسانگردی سمتی

با معادله ۳ می‌توان زاویه سمتی (ϕ) هر میون را از مؤلفه‌های اندازه حرکت آن به دست آورد و با کمک آن جهت شرقی غربی آن‌ها را تعیین نمود. نسبت بار میونی برای ذرات رسیده به نیمکره شرقی، R_E ، و نیمکره غربی، R_W ، در انرژی‌های ذره اولیه مختلف و برای دو کیوجی اس‌جت-گیشا و کیوجی اس‌جت-یوآرکیوآمدی به دست می‌آید و نسبت بار میونی متوسط در جهت‌های شرق و غرب در همه انرژی‌ها با ضریب وزنی $E^{-1/4} \Delta(\log E)$ محاسبه می‌شود. با تعریف ناهمسانگردی سمتی $A_{EW} = 2(R_W - R_E) / (R_W + R_E)$ برای مقادیر متوسط نسبت بار میونی، مقادیر ناهمسانگردی برای دو مدل گیشا و یوآرکیوآمدی به ترتیب $۰٫۱۵ \pm ۱٫۳۰$ و $۰٫۱۵ \pm ۱٫۳۱$ هستند. انحراف معیار از رابطه $\sigma = 4(R_E^2 R_W + R_W^2 R_E)^{1/5} / (R_W + R_E)^2$ به دست آمده است. این نتایج یک اثر شرقی-غربی قطعی را نشان می‌دهد.



شکل شماره (۴) توصیف شماتیکی از اثر شرقی - غربی میون‌های جوی.

اثر شرقی - غربی ناشی از برهمکنش میدان مغناطیسی زمین با ذرات باردار ثانویه خصوصا با میون‌هاست [۶ تا ۸]. شکل ۴ توصیف شماتیکی از این اثر را بر میون‌ها نشان می‌دهد. وقتی میون‌های مثبت و منفی با یک زاویه سرسویی (θ) خاص به سطح زمین می‌رسند، در واقع توسط بهمن‌های هوایی مختلفی تولید شده‌اند و به خاطر بارهای مختلف‌العلامتی که دارند انحراف‌های متفاوتی در میدان مغناطیسی زمین پیدا می‌کنند. انحراف میون‌ها به حرکت آن‌ها در دو جهت شرق و غرب بستگی دارد و میون‌های کم انرژی در میدان مغناطیسی زمین انحراف بزرگی در جهت سرسو پیدا می‌کنند. زاویه انحراف تقریبا $\psi = \frac{l}{r}$ است. که در آن l و r طول مسیر و شعاع چرخش میون هستند. برای میونی با اندازه حرکت p و انرژی E ، شعاع چرخش در میدان مغناطیسی B به اندازه $r = \frac{pc}{eCB} \approx \frac{E}{eCB}$ است. برای میدان مغناطیسی $B \approx 0.5 \times 10^{-4} \text{ T}$ شعاع چرخش بر حسب متر $r \approx 0.67 \times 10^9 (E/\text{GeV})$ است. بنابراین برای میونی با انرژی 1 GeV و زاویه سرسویی $\theta = 34^\circ$ و با ارتفاع عمودی جو $h_0 = 20 \text{ km}$ زاویه انحراف $\psi \approx 0.36 \text{ rad} \approx 21^\circ$ است. در جهت شرق طول مسیر میون مثبت بزرگتر از میون منفی است. بنابراین میون‌های مثبت و منفی که در زوایای سرسویی یکسان به تلسکوپ وارد می‌شوند در حقیقت در زوایای سرسویی متفاوت $\theta_r = \theta - \psi$ و $\theta_l = \theta + \psi$ در بالای جو تولید شده‌اند. این رویداد در سمت غرب دقیقا برعکس و طول مسیر میون‌های مثبت کوتاه‌تر است (شکل ۴). بنابراین از سویی تعداد میون‌های مثبت جو بیشتر از میون‌های منفی است و از طرفی در یک زاویه خاص در جهت غرب نسبت به شرق طول مسیر میون‌های مثبت کمتر از میون‌های منفی است. پس این ویژگی‌ها نشان می‌دهد که چگونه خم‌شدگی‌های مختلف میون‌های مثبت و منفی در میدان مغناطیسی زمین موجب یک اثر شرقی غربی می‌شود.

بحث و نتیجه گیری :

نسبت بار میون‌های جوی تولید شده توسط بهمن‌های هوایی تا اندازه‌ای به مدل‌های برهمکنش هادرونی و میدان مغناطیسی زمین حساس هستند. در این مطالعه ما اثر دو مدل گیشا و یوآرکیوادمی را بر تولید میون‌های مثبت و منفی بیان کردیم. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی کورسیکا به این شرح است:



۱. داده‌های به دست آمده نشان می‌دهد تعداد میون‌های مثبت و منفی با افزایش انرژی ذره اولیه افزایش می‌یابد. اگر ما تعداد کل میون‌های مثبت و منفی تولید شده را بر حسب تابعی از انرژی ذره اولیه در نظر بگیریم دیده می‌شود که قبل از 50 GeV ، مدل یوآرکیوآمدی میون‌های بیشتری نسبت به مدل گیشا ایجاد می‌کند و بعد از 50 GeV نتیجه برعکس می‌شود. تقریباً در همه انرژی‌های اولیه، نسبت بار میونی در مدل گیشا بیشتر از مدل یوآرکیوآمدی است. این دلالت می‌کند بر اینکه مدل گیشا بر تولید میون‌های مثبت حساس‌تر است. مقادیر متوسط نسبت بار میونی برای دو مدل کیوجی اس جت - گیشا و کیوجی اس جت - یوآرکیوآمدی به ترتیب برابر است با 1.18 ± 0.04 و 1.16 ± 0.04 که یک اختلاف نسبی حدود 2% را بین دو مدل نشان می‌دهد.

۲. مقادیر متوسط نسبت بار میونی در جهت نیمکره شرقی و غربی با مدل کیوجی اس جت - گیشا به ترتیب 1.09 ± 0.06 و 1.27 ± 0.07 و با مدل کیوجی اس جت - یوآرکیوآمدی به ترتیب 1.07 ± 0.05 و 1.25 ± 0.06 است. این ناهمسانگردی شرقی غربی ناشی از اثر میدان مغناطیسی زمین بر میون‌های باردار است.

۳. نتایج مدل کیوجی اس جت - گیشا نسبت به کیوجی اس جت - یوآرکیوآمدی مطابقت بیشتری با آزمایش دارد.

مراجع :

- [1] T.K. Gaisser, and T. Stanev Phys. Rev. D, **38**, 85 (1998).
- [2] D. Heck et al, Report FZKA6019 (Forschungszentrum Karlsruhe), (1998).
- [3] S. Abdollahi, M. bahmanabadi, and D. Purmohammad, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys., **40**, 025202 (2013).
- [4] M. Bahmanabadi, Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A **945** 162635 (2019).
- [5] M. bahmanabadi, and L. Rafezi, Phys. Rev. D, **98**, 103003 (2018).
- [6] O.C. Allkofer et al., Journ. Geophys. Research, **90**, 3537 (1985).
- [7] T. Futagami et al., Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. Lett., **82**, 5194 (1999).
- [8] P. Lipari, Astropart. Phys., **14**, 171 (2000).