

مشاهده سایه خورشید با تلسکوپ ردیاب پرتوهای کیهانی

محمد دهقانی^۱، عباس انواری^۱، محمود بهمن‌آبادی^۱، هادی هدایتی^۱، مهدی میرکازمی^۱، مهدی خاکیان^۲ و جلال صمیمی^۱

۱. دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف، صندوق پستی ۹۱۶۱-۱۱۱۵۵

۲. رصدخانه البرز، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۳/۳؛ پذیرش: ۱۳۸۸/۵/۳)

چکیده

یک تلسکوپ ردیاب پرتوی کیهانی برای اندازه‌گیری پرتوهای کیهانی که از جهت‌های مختلف (مخصوصاً جهت خورشید) می‌آیند، در دانشکده فیزیک دانشگاه شریف ساخته شده است. مشاهدات ما با این تلسکوپ، نشان می‌دهد که تعداد پرتوهای کیهانی‌ای که از جهت خورشید می‌آیند، نسبت به جهت‌های دیگر کاهش قابل ملاحظه‌ای دارد. اهمیت آماری این کاهش با روش‌های Ma و Li در طی تمام مشاهدات مقدار ۲۵ بوده است.

واژه‌های کلیدی: آشکارسازی سوسوزن، پرتوهای کیهانی، سایه خورشید

۱. مقدمه

پرتوهای کیهانی ذرات باردار پرانرژی هستند که از خارج جو وارد زمین می‌شوند. این پرتوها ممکن است در مسیر خود با خورشید برخورد کرده یا به وسیله میدان مغناطیسی آن منحرف شوند. بنابراین جهت اولیه آنها تغییر قابل مشاهده‌ای پیدا می‌کند که به آن سایه خورشید می‌گویند. این پرتوهای کیهانی در جو زمین عامل ایجاد بهمنهای گسترده هوایی هستند. در آزمایش‌های بهمنهای گسترده هوایی که دقت اندازه‌گیری زاویه‌ای آنها زیاد است، در سطح زمین سایه خورشید دیده شده است [۱ و ۲]. در شبیه‌سازی‌هایی که انجام داده‌ایم، مشاهده شده است که بین جهت پرتوی کیهانی اولیه و جهت میانگین ذرات ثانویه تولید شده توسط آن در سطح زمین، همبستگی نسبتاً قوی‌ای وجود دارد. بنابراین انتظار داریم که اگر تعداد ذرات ثانویه پرتوهای کیهانی که از جهت خورشید می‌آیند را با تعداد ذرات ثانویه پرتوهای دیگر که از جهت‌های دیگر می‌آیند مقایسه کنیم، بتوانیم سایه

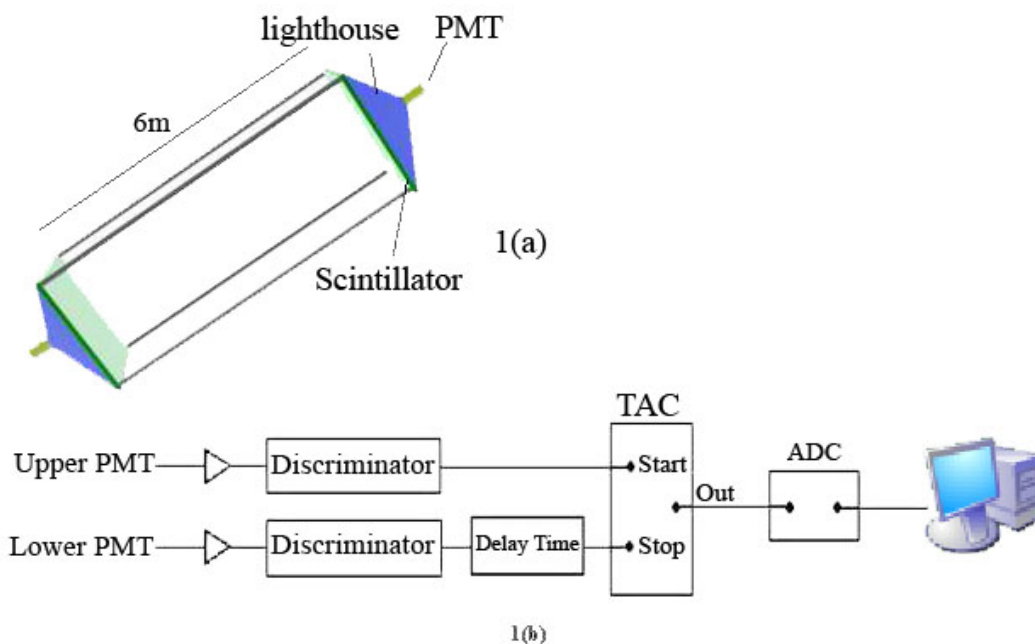
خورشید را مشاهده کنیم.

هدف این مقاله گزارش نتایج مشاهداتی است که روی سایه خورشید با استفاده از تلسکوپ پرتو کیهانی ساخت خودمان، انجام داده‌ایم. در بخش بعدی این مقاله ساختار تلسکوپ ساخته شده، روش آشکارسازی پرتوهای کیهانی و همچنین مشاهدات مختلف در مورد سایه خورشید را توصیف می‌کنیم. سپس در بخش سوم، نتایج و تحلیل داده‌ها ارائه می‌شود. بخش چهارم به بحث نتایج و جمع‌بندی اختصاص دارد.

۲. توصیف تلسکوپ و مشاهدات

۲.۱. آشکارساز پرتو کیهانی و سیستم ردیابی

برای آشکارسازی پرتوهای کیهانی به وسیله این تلسکوپ از آشکارسازهای سوسوزن استفاده شده است. دو سوسوزن پلاستیکی که هر کدام از آنها دارای مساحت ۱ متر مربع و ضخامت سه سانتیمتر هستند، به صورت موازی عمود بر یک



شکل ۱. پیکربندی تلسکوپ و مدار الکترونیکی آن.

محور به نوبه خود روی سطح افقی قرار دارند که به ما اجازه می‌دهد کل سیستم را حول محور افقی به صورت دستی بچرخانیم. به این ترتیب تغییر جهت محور و تنظیم آن امکانپذیر است.

شکل ۱(a)، نمای کلی تلسکوپ و آشکارسازهای آن را نشان می‌دهد. تلسکوپ روی پشت بام دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف با ارتفاع ۳۰ متر، قرار دارد. پالسهای فوتومالتی‌پلایرها از طریق یک کابل (RG58) به مدار الکترونیکی‌ای که در اتاق کنترل روی پشت بام قرار دارد، منتقل می‌شود. محرک موتور پله‌ای، کامپیوتر و الکترونیک مورد نیاز نیز در اتاق کنترل قرار دارند. شکل ۱(b) مدار الکترونیکی سیستم آشکارسازی را نشان می‌دهد. موتور متصل به محور دو سرعت مختلف دارد که به وسیله کامپیوتر کنترل می‌شود. دور عادی آن (سرعت ردیابی) طوری تنظیم شده است که چرخش زمین را جبران کند. دور تند آن به منظور چرخش سریع محور تلسکوپ و تنظیم آن در هر جهت دلخواه است.

۲.۲. مشاهدات

مشاهدات در یک دوره ۸۰ روزه از اسفند ۸۶ تا خرداد ۸۷ انجام شده است. هر روز دو دسته آزمایش متفاوت انجام شد.

محور مشترک (محور تلسکوپ) قرار داده شده‌اند. فاصله سوسوزنها از یکدیگر ۶ متر است. هر کدام از این سوسوزنها در یک محفظه هرمی شکل قرار دارند که مساحت قاعده آنها با مساحت بلور سوسوزن یکی بوده و ارتفاع آن برای بیشترین بازده بهینه شده است (برای مشاهده جزئیات به مرجع [۳] مراجعه شود). پذیرفتاری هندسی محاسبه‌شده آشکارساز در حدود $274 \text{ cm}^2 \text{ sr}$ است. پالس نوری تولید شده در سوسوزن توسط یک فوتومالتی‌پلایر که در رأس محفظه هرمی شکل قرار دارد، جمع‌آوری و آشکار می‌شود (شکل ۱). هنگامی که یک ذره ثانویه از هر دو سوسوزن عبور کرده و اختلاف زمان آشکارسازی آن در دو سوسوزن کمتر از 200 نانوثانیه باشد، این ذره ثانویه ثبت خواهد شد. پنجره زمانی 200 نانوثانیه‌ای را مبدل زمان به دامنه تنظیم می‌کند. کل سیستم آشکارسازها با محفظه‌های هرمی آنها روی یک ساختار فولادی نسبتاً سبک قرار گرفته است. این ساختار فولادی به نوبه خود روی یک محور چرخان قرار دارد. راستای محور در راستای شمالی-جنوبی کره سماوی است و می‌توان آن را به وسیله یک موتور پله‌ای^۱ همراه جعبه دنده و تسمه فلزی با سرعت دلخواه به چرخش درآورد. ساختار فولادی و

۱. stepper motor

به این طریق مطمئن می‌شویم که تلسکوپ در دو حالت، مسیر یکسانی را جاروب کرده است و بنابراین تنها تفاوت دو روش، وجود خورشید در مسیر پرتوهای کیهانی در حالت روشن است.

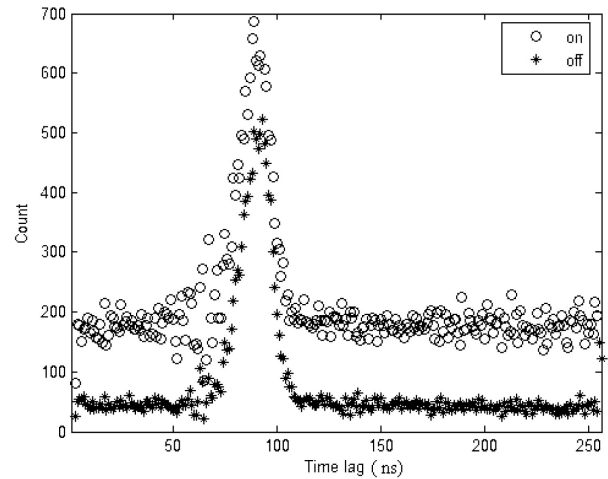
۳. نتایج و تحلیل داده‌ها

۳.۱. مقایسه شمارش پرتوهای کیهانی در دو حالت روشن و خاموش
شکل ۲ توزیع اختلاف زمانی پرتوهای کیهانی ثبت شده توسط تلسکوپ را برای دو دسته مشاهدات فوق نشان می‌دهد. در این طیفها هر شمارش یک رخداد ثبت شده توسط مبدل زمان-دامنه است. این رخداد متناظر با عبور یک ذره از هر دو سوسوزن شکل ۱ است. شماره کانال متناظر با فاصله زمانی بین شروع و اتمام یک سیگنال است (۸/۰ نانوثانیه بر کانال). اختلاف اصلی این طیفها در شمارش کل در اطراف قله است. برای محاسبه شمارش کل زیر قله (رخدادهای حقیقی) برای هر طیف، شمارش پس زمینه (که از کانالهای دور از قله به دست آمده است) از شمارش کل کسر شده است. جدول ۱ رخدادهای حقیقی دو دسته مشاهده را نشان می‌دهد. خطاهای نشان داده شده در جدول فقط خطاهای آماری هستند.

نرخ آشکارسازی پرتوهای کیهانی به چند عامل وابسته است. ممکن است کارکرد فوتومالٹی پلایر و بلور سوسوزن به دما وابسته باشد، ولی تأثیری بر کار ما ندارد چون در طی آزمایشهای ما تغییرات دمایی بسیار کم بود. مسئله مهمتر بستگی نرخ آشکارسازی به تغییرات فشار جو است. معمولاً می‌توان داده‌های مربوط به فشار جو را از اداره هواشناسی محلی دریافت کرد. تاکنون روشهای مختلفی برای بررسی تأثیر فشار و دما بر نرخ رخدادها استفاده شده است [۵]. بستگی شدت پرتوهای کیهانی به فشار جو در بازه‌های نیم ساعته در شکل ۳ نشان داده شده است. می‌توان این بستگی را با تابع زیر نشان داد:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{P_0 - P_i}{P_0}\right) \quad (1)$$

مقادیر $R_0 = 52$ رخداد بر نیم ساعت، $P_0 = 881 \text{ mb}$ و $P_i = 447 \text{ mb}$ از روی داده‌ها به دست آمده است. P_i نشان دهنده

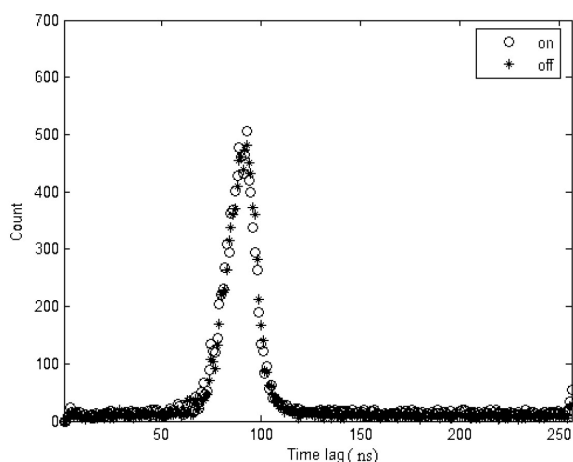


شکل ۲. طیف اختلاف زمانی پرتوهای کیهانی در حالت روشن (on) و حالت خاموش (off).

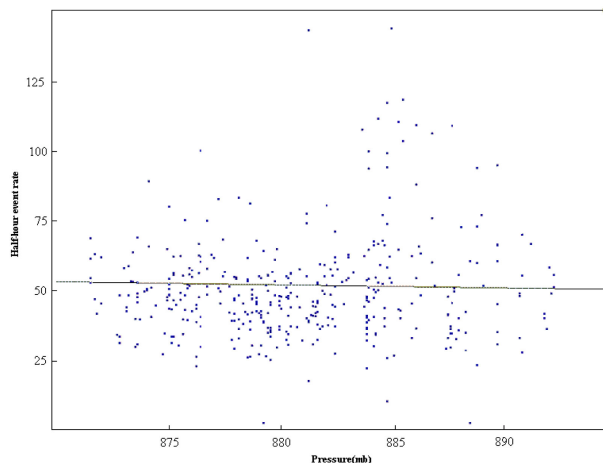
برای دسته اول محور تلسکوپ در جهت خورشید تنظیم شد. سپس با استفاده از موتور پله‌ای جهت خورشید را دنبال کرد (حالت روشن). در دسته دیگر مشاهدات تلسکوپ در جهتی تنظیم شد که مسیر حرکت خورشید را قطع نکند (حالت خاموش). برای هر مشاهده تعداد پرتوهای کیهانی عبوری از تلسکوپ و همچنین اختلاف زمانی بین پالسهای دو فوتومالٹی پلایر (برای هر پرتوی کیهانی) در طی یک دوره پیوسته ۴ ساعته ثبت شده است. تعداد ذرات ثانویه پرتوهای کیهانی وابسته به جهت پرتو کیهانی اولیه (زوایای سوسویی و سمتی آن) است. به ویژه بستگی تعداد ذرات ثانویه به زاویه سوسویی (که با عمق جو طی شده توسط پرتوی کیهانی مرتبط است) قوی‌تر است. به منظور اطمینان از یکسان بودن شرایط برای هر دو دسته آزمایشها تمهیدات زیر اندیشیده شد: هر روز ساعت ۱۰ با استفاده از دور سریع موتور، محور تلسکوپ به صورت دستی در جهت خورشید تنظیم شد. سپس با دور کند موتور به مدت ۴ ساعت، تا ساعت ۲ بعد از ظهر اندازه‌گیری حالت روشن انجام شد. پس از یک ساعت خاموش کردن سیستم دوباره از ساعت ۳ با دور تند موتور جهت محور تلسکوپ در جهت اولیه حالت روشن تنظیم شد و سپس با دور کند همان مسیر قبلی را به مدت ۴ ساعت برای حالت خاموش طی کرد.

جدول ۱. رخداد‌های ثبت شده در دو حالت روشن (on) و حالت خاموش (off).

| | داده‌های خام | داده‌ها با تصحیح فشار |
|-----------|---------------|-----------------------|
| N_{on} | 8699 ± 93 | 8517 ± 92 |
| N_{off} | 8748 ± 93 | 8763 ± 94 |
| S | ۰/۴ | ۲ |



شکل ۴. همان شکل ۲ اما این بار با تصحیح فشار.



شکل ۳. نرخ رخدادها بر نیم ساعت بر حسب تابعی از فشار.

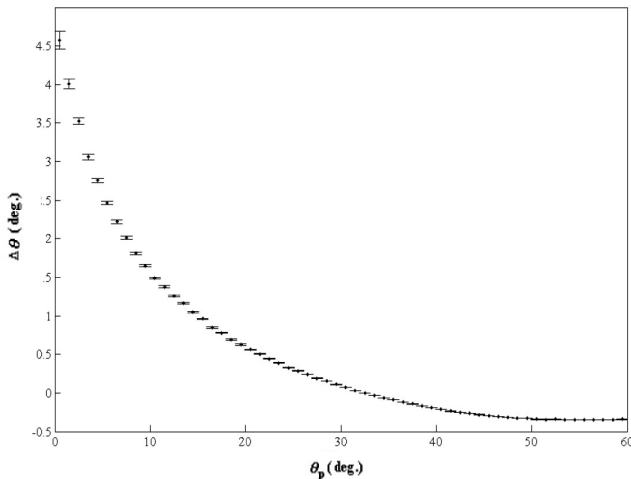
۲.۳. تحلیل داده‌ها بر حسب زوایای سرسویی

با استفاده از داده‌های جغرافیایی مکان مشاهده ($35^{\circ}43'N$ ، $51^{\circ}20'E$ ، و ارتفاع 1200 متر از سطح دریا که معادل با عمق جو 890 گرم بر سانتیمتر است) و داده‌ها و زمان مشاهدات و همچنین مختصات خورشید در حالت حرکت، زاویه سرسویی متوسط (θ) محور تلسکوپ را به دست آوردیم. از آنجایی که محور تلسکوپ در ناحیه‌ای کمتر از 30° درجه حرکت می‌کند، تفاوت شمارش رخدادها (بر حسب شمارش بر دقیقه) در دو حالت روشن و خاموش را در سه زاویه میانگین 10° ، 20° و 30° درجه مقایسه کردیم. شکل ۵ این مقادیر را برای سه زاویه مذکور مقایسه می‌کند. در این شکل به خوبی مشخص است که مقادیر در حالت روشن کمتر از حالت خاموش است. پس نتیجه می‌شود با وجود تفاوت شمارش در زوایای مختلف، سایه خورشید مشاهده می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که تفاوت حالت‌های روشن و خاموش با افزایش زاویه سرسویی کاهش می‌یابد.

فشار جو اندازه‌گیری شده در زمان داده‌گیری است. با این تابع تجربی به داده‌های خام وزن داده‌ایم. شکل ۴ توزیع اختلاف زمانی با تصحیح فشار جو را نشان می‌دهد. برای محاسبه شمارش کل زیر قله برای هر طیف همان روش قبل را استفاده کرده‌ایم.

جدول ۱ (ستون سوم) شمارش کل پرتوهای کیهانی آشکار شده را با تصحیح فشار نشان می‌دهد. طبق مشاهدات ما، تصحیح فشار اختلاف زیادی در نتایج ایجاد می‌کند. در جدول ۱ مشاهده می‌شود که تعداد پرتوهای کیهانی آشکار شده در حالت روشن کمتر از حالت خاموش است. این کاهش تعداد پرتوهای کیهانی در حالت روشن نسبت به حالت خاموش، همان چیزی است که ما آن را سایه خورشید می‌نامیم. سطر آخر جدول اهمیت آماری این کاهش را برای حالت‌های با تصحیح فشار و بدون تصحیح فشار نشان می‌دهد.

اهمیت آماری از $S = (N_{off} - N_{on}) / \sqrt{N_{off} + N_{on}}$ به دست می‌آید [۶]. N_{off} و N_{on} به ترتیب تعداد کل رخداد‌های حقیقی برای حالت روشن و حالت خاموش است.



شکل ۶. توزیع $\Delta\theta = \theta_m - \theta_p$ بر حسب θ_p .

اولیه، θ_p ، نشان می‌دهد. در این شکل $\Delta\theta = \theta_m - \theta_p$ اختلاف زاویهٔ سرسویی ذرهٔ اولیه و متوسط زوایای سرسویی ذرات ثانویه است. همان طور که در این شکل دیده می‌شود به طور متوسط θ_m در یک ناحیهٔ باریک ($4/5^\circ \leq \theta \leq 5/5^\circ$) حول صفر قرار دارد. همچنین زاویهٔ بین جهت ذرهٔ اولیه و جهت متوسط ذرات ثانویه، Γ ، نیز محاسبه شده است. از هندسهٔ کروی داریم:

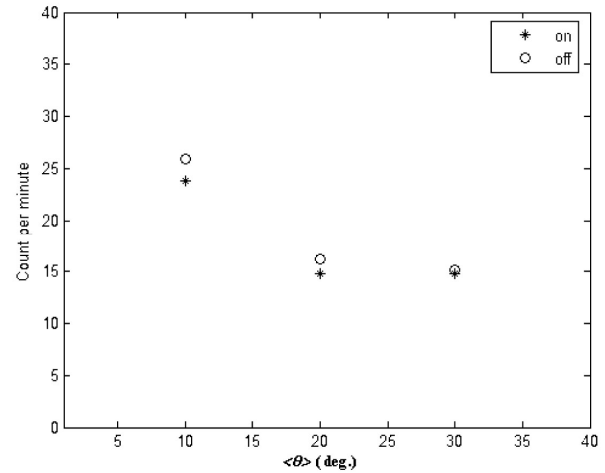
$$\cos \Gamma = \cos \theta_m \cos \theta_p + \sin \theta_m \sin \theta_p \cos(\varphi_m - \varphi_p) \quad (2)$$

که در آن φ_m و φ_p به ترتیب زوایای سمتی متوسط ذرات ثانویه و ذرهٔ اولیه هستند. شکل ۷ تابع توزیع زاویهٔ Γ را نشان می‌دهد. مقدار میانگین آن $2/7$ درجه است. بنابراین بستگی خوبی بین جهت اولیهٔ ذرات و جهت متوسط ذرات ثانویه وجود دارد.

۴.۳. شعاع مؤثر خورشید

پرتوهای کیهانی ذرات باردار هستند. بنابراین توسط میدان مغناطیسی خورشید منحرف می‌شوند. مطابق نتایج رصدخانهٔ اشعه گامای میلاگرو^۱ شعاع مؤثر خورشید در حدود ۱ درجه است. در حالی که شعاع هندسی آن $0/25$ درجه است. یک برنامهٔ شبیه‌سازی برای محاسبهٔ کاهش شار پرتوهای کیهانی در اثر حضور خورشید نوشته شده است.

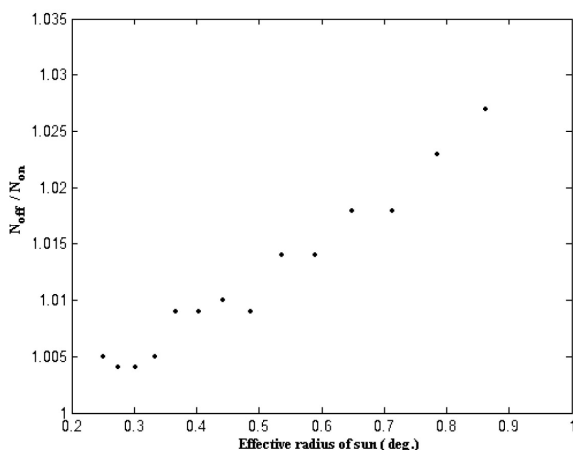
در این شبیه‌سازی هر سوسوزن به 20×20 سلول مجزا



شکل ۵. نرخ رخدادها (بر دقیقه) بر حسب میانگین زاویه سرسویی برای حالت‌های خاموش و روشن.

۳.۳. نتایج داده‌های شبیه‌سازی

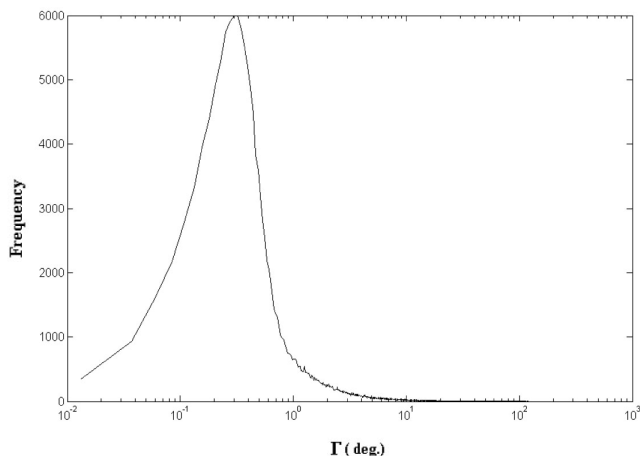
برای شبیه‌سازی بهمنا از نرم افزار $CORSIKA$ [۷] استفاده شده است. $CORSIKA$ بهمناهایی را که ذرهٔ اولیهٔ آنها فوتون، پروتون، هسته یا هر ذرهٔ دیگری باشد، شبیه‌سازی می‌کند. برای برهم‌کنش هادرونی در انرژیهای زیاد از مدل $QGSIJET$ [۸] و در انرژیهای پایین از $GHEISHA$ [۹] استفاده شده است. مقادیر مؤلفه‌های میدان مغناطیسی در تهران ($B_x = 28/06 \mu T$ و $B_z = 38/37 \mu T$) از مرکز داده‌های ژئومغناطیسی آمریکا به دست آمده است [۱۰]. محدودهٔ انرژی ذرات اولیه از 50 TeV تا 5 PeV با شار دیفرانسیلی ($dN/dE \propto E^{-2/7}$) داده شده است. این شبیه‌سازیها برای جهت‌های مختلف با زاویهٔ سرسویی 0 تا 60 درجه و زاویهٔ سمتی از 0 تا 360 درجه انجام شده است. آنجایی که بیشتر سهم میونهای تولید شده از پروتونهاست، فقط این نوع ذرات به عنوان ذرهٔ اولیه در نظر گرفته شد. یک توزیع همسانگرد برای ذرات ورودی در بالای جو در نظر گرفته‌ایم. همهٔ اطلاعات دربارهٔ ذرات ثانویهٔ تولید شده به وسیلهٔ این بهمناها در سطح زمین در فایل‌هایی برای تحلیل‌های بعدی ذخیره شده است. ما نتایج تحلیل این بهمناهای شبیه‌سازی شده را ارائه می‌کنیم. برای هر بهمنا متوسط زوایای سرسویی و سمتی ذرات باردار ثانویه (میونها) محاسبه شده است. شکل ۶ بستگی میانگین زاویهٔ سرسویی ذرات ثانویه، θ_m ، را به زاویهٔ سرسویی ذرات



شکل ۸. نسبت رخداد در حالت خاموش به حالت روشن برحسب شعاع مؤثر خورشید.

جهت اولیه آنها با خطای تقریبی $2/7$ درجه یکسان است. بنابراین تعبیر این کاهش به عنوان سایه خورشید تأیید می‌شود. می‌توانیم با نتایج مشاهداتمان شعاع مؤثر خورشید که بر اثر تأثیر میدان مغناطیسی آن بر پرتوهای کیهانی به وجود می‌آید را به دست آوریم. تخمین این شعاع مؤثر، بر مبنای نتایج مشاهدات (که کاهش شار پرتوهای کیهانی را ۲ درصد محاسبه کردیم) و همچنین یک شبیه‌سازی مفصل، به دست آمد. در این شبیه‌سازی هر سوسوزن را به چهارصد سلول یکسان تقسیم کردیم. سپس 1000 ذره در جهت‌های تصادفی از هر یک از سلول‌های سوسوزن بالایی فرستاده شدند. اگر ذره از سوسوزن پایینی بگذرد آن را به عنوان یک شمارش معتبر در نظر می‌گیریم. سپس تمام این فرآیند را با فرض وجود خورشید تکرار کردیم (یعنی اگر زاویه سوسوی ذرات از مقدار خاصی کمتر بود، شمارش آن ذره را در نظر نگرفتیم. برای هر اجرای برنامه شعاع مؤثر خورشید را تغییر داده سپس شمارشها را در دو حالت روشن و خاموش مقایسه کردیم. نتایج این شبیه‌سازی در شکل ۸ نشان داده شده است و نسبت سیگنال‌های خاموش به روشن (N_{off}/N_{on}) بر حسب شعاع مؤثر خورشید در این شکل نشان داده شده است.

همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، شعاع 0.75 درجه به خوبی با نتیجه ۲٪ کاهش شار سازگار است. مشاهدات رصدخانه میلاگرو [۱۱] شعاع خورشید را در حدود ۱ درجه به دست آورده است که بنابراین سازگاری خوبی با نتایج ما دارد.



شکل ۷. تابع توزیع زاویه بین جهت ذره اولیه و جهت میانگین ذرات ثانویه.

تقسیم شده است. سپس 1000 ذره در جهت‌های تصادفی از هر کدام از سلول‌های سوسوزن بالایی فرستاده شدند. اگر ذرات از سوسوزن پایینی عبور می‌کردند به عنوان یک رخداد معتبر محسوب می‌شدند. این فرآیند دوباره با در نظر گرفتن وجود خورشید تکرار شد. اگر زاویه سوسوی ذره اولیه کمتر از یک مقدار خاص باشد (این مقدار، پارامتر شبیه‌سازی است) ذره را به عنوان رخداد در نظر نمی‌گیریم. از طرف دیگر نسبت سیگنال‌های حالت خاموش به روشن در آزمایشها مقدار $1/0.21$ است. برای تخمین شعاع مؤثر خورشید، پارامتر شبیه‌سازی تغییر داده شد تا نسبت حالت خاموش به روشن با آزمایشها یکی شود. شکل ۸ نشان می‌دهد که خروجی شبیه‌سازی (نسبت سیگنال‌های حالت خاموش به روشن) زمانی که شعاع مؤثر خورشید 0.75 در نظر گرفته شود، با نتایج آزمایش یکی است. این نتیجه نسبتاً با نتایج رصدخانه میلاگرو هم‌خوانی دارد.

۴. جمع بندی

مشاهدات ما نشان می‌دهد که شار پرتوهای کیهانی وقتی تلسکوپ در جهت خورشید باشد نسبت به حالتی که در جهت خورشید نباشد، کاهش نشان می‌دهد. اهمیت آماری این کاهش با روش Li و Ma برای همه مشاهدات مقدار 2σ به دست آمده‌اند. از طرف دیگر همان‌طور که از شبیه‌سازیهای $CORSIKA$ مشخص شد، جهت میانگین ذرات ثانویه پرتوهای کیهانی با

مراجع

- Kalmykov and S S Ostapchenko and A I Pavlov, *Izv. RAN Ser. Fiz.* **58** N12, (1994)21; N N Kalmykov and S S Ostapchenko and A I Pavlov, *Bull. Russ. Acad. Science(Physics)* **58** (1994) 1966; N N Kalmykov and S S Ostapchenko and A I Pavlov, *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)* **52B** (1997)17.
9. H Fesefeldt, *Report PITHA-85/02*, RWTH Aachen, Germany (1985).
10. <http://www.ngdc.noaa.gov/seg/pot°d/geomag.html> (2002).
11. X Xu, *28th ICRC*, Tokyo, Japan, SH 3.4 (2003) 4065.
1. M Ambrosio et al., *Astroparticle physics* **20**, 2 (2003) 147.
2. M Amenomori et al., *Advances in Space Research* **38**, 5 (2006) 936.
3. M Bahmanabadi et al., *Experimental Astronomy* **8** (1998) 211.
4. S M H Halataei, *Phys. Rev. D* **77**, 8 (2008) e083001.
5. T Antoni et al., *ApJ*, **687** (2004).
6. T Li, and Y Ma, *ApJ*, **317** (1983)
7. D Heck et al., *Report FZKA6019*, Forschungszentrum Karlsruhe (1998).
8. N N Kalmykov and S S Ostapchenko, *Yad. Fiz* **56** (1993)105; *Phys. At. Nucl.* **56** N3, (1993) 346; N N