

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

تصحیح اندازه‌گیری جهت رسیدن پرتوهای کیهانی پرنرژی در آرایه‌های سطحی

هادی هدایتی خلیل‌آباد، منیره امامی نیگجه

دانشکده‌ی فیزیک دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی، تهران، خیابان شریعتی، بالاتر از پل سیدخندان، خیابان شهید مجتبیایی، خیابان شهید کاویان، شماره ۹

چکیده

برای اندازه‌گیری جهت رسیدن پرتوهای کیهانی در یک آرایه‌ی سطحی معمولاً از تقریب جبهه‌ی موج تخت استفاده می‌کنند. در این روش فرض بر این است که جبهه‌ی بهمن هوایی تولیدشده توسط یک پرتوی کیهانی یک جبهه‌ی تخت است. در این مقاله ما روشی ارائه می‌کنیم که تقریب جبهه‌ی تخت را تا حد قابل توجهی بهبود می‌بخشد. این روش بر مبنای وزن دادن به هر یک از آشکارسازهای یک آرایه‌ی سطحی عمل می‌کند.

پرتوهای کیهانی^۱ ذراتی بسیار پرنرژی هستند که از فضای خارج به زمین می‌رسند. طیف پرتوهای کیهانی به‌گونه‌ای است که با افزایش انرژی آن‌ها شار آن‌ها به‌سرعت کاهش می‌یابد. گرچه در انرژی‌های حدود GeV می‌توان این پرتوها را به‌طور مستقیم در بالای جو به‌وسیله‌ی ماهواره‌های فضایی یا بالن‌ها مشاهده کرد؛ ولی در انرژی‌های بالاتر از TeV آن‌قدر شار آن‌ها کم می‌شود که دیگر ابزارهای مستقر در بالای جو که معمولاً مساحت کوچکی دارند، قادر به اندازه‌گیری آن‌ها نیستند. برای آشکارسازی این محدوده جو زمین نقش محیط آشکارسازی را دارد. در جو زمین پرتوهای کیهانی در برخورد با مولکول‌های هوا و طی برهمکنش‌های متعدد ذرات بنیادی، تعداد بسیار زیادی ذره‌ی ثانویه تولید می‌کنند که به مجموع این ذرات ثانویه یک بهمن گسترده‌ی هوایی^۲ گفته می‌شود.

بهمن‌های گسترده هوایی اطلاعاتی مفیدی را درباره‌ی پرتوی کیهانی اولیه‌ی تولیدکننده‌ی آن‌ها در بردارند. مهم‌ترین اطلاعاتی که می‌توان از یک بهمن گسترده‌ی هوایی به دست آورد جهت، اندازه‌ی بهمن (تعداد کل ذرات باردار آن) و مکان هسته‌ی آن (محل برخورد جهت اولیه پرتوی کیهانی یا محور بهمن به سطح زمین) است. این پارامترها به‌نوبه‌ی خود با جهت و انرژی پرتوی کیهانی اولیه‌ی تولیدکننده‌ی بهمن ارتباط مستقیم دارند. در این مقاله بحث ما در مورد روشی برای یافتن جهت رسیدن بهمن گسترده‌ی هوایی است.

معمولاً ذرات بهمن گسترده‌ی هوایی به‌صورت یک عرق چین وارونه توزیع می‌شوند. ذرات در نزدیک محور بهمن در یک جبهه‌ی تخت کم ضخامت توزیع می‌شوند؛ درحالی‌که جبهه‌ی ذرات در فواصل دور از محور بهمن انحنا و ضخامت بیشتری دارد. همچنین در نزدیکی محور بهمن چگالی ذرات بسیار بیشتر از نواحی دورتر از محور بهمن است.

رایج‌ترین روش به دست آوردن جهت بهمن گسترده‌ی هوایی برآزش یک صفحه‌ی تخت با جبهه‌ی جلویی بهمن است. در این روش کافی است در سه آشکارساز آرایه زمان رسیدن ذرات ثانویه‌ی جبهه‌ی جلویی بهمن را بدانیم. در این صورت می‌توان زاویه‌ی سمتی و سرسویی محور بهمن را به دست آورد. ولی معمولاً در

¹ Cosmic Rays

² Extensive Air Shower

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

آرایه‌های سطحی در تعداد بیشتری از آشکارسازها زمان رسیدن ذرات ثانویه جبهه‌ی بهمین ثبت می‌شود و سپس با استفاده از روش کمترین مربعات یک صفحه‌ی تخت با جبهه‌ی بهمین برازش داده می‌شود. گاهی برای دقت بیشتر انحنای جبهه‌ی بهمین را هم در نظر می‌گیرند [۱]. البته این تصحیح عمومیت ندارد و برای هر آرایه این تصحیح متفاوت است.

در این مقاله ما با استفاده از روشی که قبلاً برای به دست آوردن مکان هسته‌ی بهمین گسترده‌ی هوایی ابداع شده است، سعی در تصحیح تقریب جبهه‌ی تخت برای یافتن جهت رسیدن بهمین خواهیم کرد.

تصحیح روش مرکز جرم وزنی برای یافتن جهت رسیدن بهمین

معمولاً برای یافتن مکان هسته‌ی بهمین هوایی از برازش تابعی با نام «تابع توزیع عرضی» بر تعداد ذرات مشاهده شده توسط آشکارسازهای آرایه استفاده می‌شود. این تابع چگالی ذرات را برحسب فاصله از محور بهمین برای یک بهمین به‌خصوص پیش‌بینی می‌کند. در یک روش جایگزین که اخیراً توسط یک از نویسندگان این مقاله و همکارانش پیشنهاد شده است [۲، ۳ و ۴]؛ به هر یک از آشکارسازهای آرایه یک وزن به‌خصوص آماری که از روی تعداد ذرات آشکار شده در آشکارسازهای تحریک‌شده‌ی یک آرایه در طی یک رخداد بهمین هوایی و فاصله‌ی بین آن‌ها به دست می‌آید، نسبت داده می‌شود. به‌طور خلاصه برای یافتن این وزن آماری ابتدا یک‌فاصله‌ی سه‌بعدی بین ذرات آشکار شده در دو آشکارساز \vec{A}_i و \vec{A}_j به دست می‌آید (جزئیات آن را می‌توانید در مرجع [۴] مشاهده کنید)؛ سپس حاصل ضرب ذرات آشکار شده در هر کدام از این دو آشکارساز، n_i و n_j تقسیم بر این فاصله‌ی سه‌بعدی می‌شود. برای هر زوج آشکارساز تحریک‌شده‌ی آرایه این عدد $n_i n_j / d_{ij}$ به دست می‌آید. زوجی که عدد آن بیشترین مقدار شد، انتخاب می‌شود و عدد به‌دست آمده به‌عنوان وزن به آشکارسازی نسبت داده می‌شود که تعداد ذره‌ی بیشتری آشکار کرده است (اگر فرض کنیم آشکارساز \vec{A}_i تعداد ذره‌ی بیشتری آشکار کرده است: $w_i = n_i n_j / d_{ij}$). سپس آشکارسازی که وزن دارد، از فهرست آشکارسازها حذف شده و برای آشکارسازهای باقی‌مانده همین چرخه ادامه می‌یابد تا آنکه تمامی آشکارسازهای تحریک‌شده‌ی آرایه دارای وزن شوند. وزن آشکارساز باقی‌مانده‌ی آخر، مساوی آشکارساز ماقبل قرار داده می‌شود.

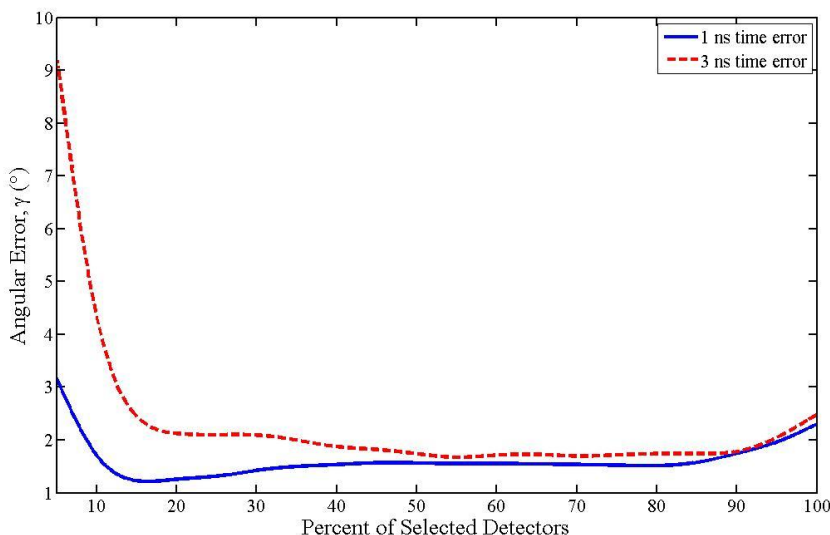
گرچه روش پیشنهادی محاسبه‌ی وزن آشکارسازها صرفاً برای یافتن مکان هسته‌ی بهمین مورد استفاده قرار گرفته است (گرانینگ وزنی آشکارسازهای تحریک‌شده) $(y_c = \sum_i w_i y_i / \sum_j w_j$ و $x_c = \sum_i w_i x_i / \sum_j w_j)$ به‌عنوان مکان هسته‌ی بهمین در نظر گرفته شده است) ولی بررسی‌های بیشتر ما نشان می‌دهد که از وزن آشکارسازها می‌توان برای تصحیح زاویه‌ای نیز استفاده کرد.

همان‌طور که در قسمت مقدمه گفتیم در ناحیه‌ی نزدیک محور بهمین جبهه‌ی بهمین تخت‌تر بوده و انحنای کمتری نسبت به نواحی دور از هسته‌ی بهمین دارد؛ بنابراین اگر به‌جای استفاده از همه‌ی آشکارسازها در تقریب جبهه‌ی تخت فقط از تعدادی از آن‌ها که وزن بیشتری دارند، استفاده کنیم، احتمالاً تقریب بهتری از جهت رسیدن بهمین خواهیم داشت.

برای امتحان این روش از ۳۰۰۰۰۰ بهمین شبیه‌سازی شده با نرم‌افزار کورسیکا [۵] استفاده شده است که خصوصیات آن‌ها به شرح زیر است: ارتفاع متوسط تهران (۱۲۰۰ متر) و میدان مغناطیسی آن ($B_x = 28.1 \mu T$ و $B_z = 38.4 \mu T$)، به‌عنوان ورودی داده شده است. محدوده‌ی انرژی بهمین‌ها از ۵۰ TeV تا ۵ PeV و زاویه‌ی سرسویی آن‌ها از ۰° تا ۶۰° انتخاب شده است. برای مدل انرژی بالا از QGSJET و برای مدل انرژی پایین از Gheisha استفاده شده است. سایر پارامترهای بهمین‌ها همان پیش‌فرض‌های کورسیکا بوده است.

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

یک آرایه‌ی فرضی مربعی به طول ضلع ۲۰۰ متر در نظر گرفته شده است که ۲۱×۲۱ آشکارساز بافاصله‌ی ۱۰ متر روی آن قرار گرفته‌اند. هر آشکارساز فرضی زمان اولین ذره‌ی باردار ثانویه رسیده و همچنین تعداد کل ذرات عبوری را ثبت می‌کند. سپس دو عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۱۰۰- و ۱۰۰+ تولید شده که مکان واقعی هسته‌ی بهمن را نشان می‌دهد. هر بهمن شبیه‌سازی شده به این ترتیب ۱۰ بار روی این آرایه فرضی توزیع می‌شود. اگر در هر کدام از این دفعات بیش از ۱۲ درصد آشکارسازهای آرایه تحریک شدند، این بهمن به عنوان یک بهمن مفید در نظر گرفته شده و جهت رسیدن آن با استفاده از روش تقریب صفحه‌ی تخت برای آشکارسازهایی که وزن بیشتری دارند، محاسبه می‌شود.



شکل ۱: خطای تقریب جبهه‌ی تخت برای محاسبه‌ی جهت رسیدن بهمن هوایی برحسب درصد تعداد آشکارسازهای با وزن بالاتر. رنگ آبی مربوط به داده‌های با خطای زمانی ۱ نانوثانیه و رنگ قرمز مربوط به خطای ۳ نانوثانیه است. مقدار کمینه‌ی خطای زاویه‌ای به ازای انتخاب ۱۶ درصد آشکارسازهای با وزن بیشتر در خطای ۱ نانوثانیه صورت می‌گیرد (مقدار خطای زاویه‌ای ۱/۲ درجه) که نسبت به تقریب صفحه‌ی تخت با در نظر گرفتن کل آشکارسازهای تحریک شده (مقدار خطای زاویه‌ای ۳/۲ درجه) حدود ۵۰ درصد بهبود را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن خطای زمانی ۳ نانوثانیه مقدار خطا در ۵۵ درصد آشکارسازها حدود ۱/۶ درجه است که در مقایسه با تقریب صفحه‌ی تخت برای کل آشکارسازهای تحریک شده که حدود ۲/۵ است، بازهم بهبود خوبی را نشان می‌دهد.

نتیجه

برای محاسبه‌ی خطای جهت رسیدن بهمن، ابتدا جهت بهمن از تقریب صفحه‌ی تخت به دست آمده و سپس زاویه‌ی بین این جهت با جهت اولیه‌ی پرتوی تولیدکننده‌ی بهمن که نرم‌افزار کورسیکا می‌دهد، به دست می‌آید. سپس بین تمام بهمن‌هایی که شرط آستانه را برآورده می‌کنند، متوسط گیری صورت گرفته است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید تقریب صفحه‌ی تخت در تعداد بخصوصی از آشکارسازهای دارای وزن بالاتر نتیجه‌ی بهتری در بردارد. برای یک آرایه‌ی سطحی نوعی خطای زمانی آشکارسازها حدود ۳ ns [۶] و برای آرایه‌های پیشرفته‌تر [۷] می‌تواند تا حدود کمتر از ۱ ns باشد. برای منظور کردن خطای زمانی یک عدد تصادفی با توزیع گاوسی و میانگین صفر و انحراف استاندارد ۱ و ۳ نانوثانیه به داده‌های زمانی ذرات اضافه شده است. همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌کنید این روش تا حد ۳ نانوثانیه نیز از تقریب صفحه‌ی تخت برای همه‌ی آشکارسازهای آرایه نتایج بهتری در بردارد.

مقاله نامه بیست و دومین کنفرانس بهاره فیزیک (۳۱-۳۰ اردیبهشت ۱۳۹۴)

مرجع‌ها

1. Acharya, B. S., et al., *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **19.7** (1993): 1053.
2. Hedayati Kh, H., et al., (2009). 31st ICRC, Łódź, Poland.
3. Hedayati Kh, H., et al., *Astroparticle Physics* **34.9** (2011): 699-704.
4. Hedayati Kh, H., et al., *The Astrophysical Journal* **727.2** (2011): 66.
5. Knapp, J., et al. CORSIKA: A Monte Carlo code to simulate extensive air showers. Vol. **6019**. FZKA, 1998.
6. Gupta, S. K., et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **540.2** (2005): 311-323.
7. Antoni, T., et al., *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A* **513.3** (2003): 490-510.