

تعیین انرژی اولیه پرتوهای کیهانی در آرایه رادیویی SURA

فاطمه لطیفیان^۱، گوهر رستگارزاده^{۱*}

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان

چکیده

در این مقاله روشی جدید به منظور تعیین انرژی اولیه پرتوهای کیهانی که یکی از مهم‌ترین مشخصات پرتوهای کیهانی است ارائه می‌شود. این روش بر پایه مقایسه شدت سیگنال رادیویی شبیه سازی و شدت سیگنال رادیویی تجربی است. در این روش که مستقل از محل هسته بهمن است با بدست آوردن عامل مقیاس که نسبت میانگین شدت سیگنال رادیویی شبیه سازی به شدت سیگنال رادیویی تجربی است، انرژی اولیه پرتوهای کیهانی با بیشینه خطای حدود ۱۴ درصد تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: انرژی اولیه پرتو کیهانی، آرایه رادیویی SURA، عامل مقیاس.

Determination of cosmic rays' primary Energy at SURA Radio Array

F. Latifian¹, G. Rastegarzadeh^{1*}

¹ Faculty of Physics, Semnan university, Semnan, Iran

Abstract

In this paper, a new method for reconstructing the primary energy of cosmic rays which is one of the main parameters of cosmic rays is proposed. This approach is based on a comparison between the intensity of the simulated radio signal and the experimental one. In this method which is independent of the core position, by calculating the scale factor which is the mean ratio between the simulated and experimental signal's intensity, the primary energy is determined with a maximum error of about 14%.

Key words: Primary energy of cosmic ray, SURA radio array, scale factor.

مقدمه

پرتوهای کیهانی ذرات بارداری هستند که از خارج جو زمین وارد می‌شوند و در مسیر خود به سمت زمین با مولکول‌های جو اندرکنش می‌کنند و آبشاری از ذرات ثانویه بوجود می‌آورند که به آن بهمن گسترده هوایی (EAS) گفته می‌شود. انرژی پرتوهای کیهانی از 10^9 eV تا بیش از 10^{20} eV گسترش پیدا می‌کند و به دلیل افت بسیار سریع شار پرتوهای کیهانی با افزایش مقادیر انرژی اولیه، ذرات پرنرژی را نمی‌توان به طور مستقیم شناسایی کرد. بنابراین، پرتوهای کیهانی با انرژی‌های بالاتر از 10^{10} eV، را می‌بایست با اندازه‌گیری بهمن‌های گسترده هوایی (EAS) شناسایی کرد [۱]. در سال‌های اخیر آشکارسازی رادیویی پرتوهای کیهانی به طور ویژه مورد توجه قرار گرفته است. زیرا امکان تعیین مهم‌ترین مشخصات یک پرتو کیهانی از جمله جهت ورود، نوع و انرژی آن با استفاده از اندازه‌گیری‌های رادیویی در کنار ویژگی‌های مثبت دیگری همچون امکان فعالیت در شرایط جوی مختلف و هزینه کم‌تر نسبت به سایر روش‌های موجود مانند آشکارسازی نور چرنکوف و فلورسانس، باعث شده است تا آزمایشگاه‌های مختلف اقدام به استفاده از این رویکرد در کنار روش‌های دیگر نمایند. در این بین، آرایه رادیویی دانشگاه سمنان (SURA) با بهره‌گیری از چهار عدد آنتن لگاریتمی - تناوبی که در چهارگوشه پشت بام دانشکده فیزیک دانشگاه سمنان استقرار یافته است مشغول ثبت کاندیدهای پرتو کیهانی با انرژی بالاتر از 10^{17} eV در باند فرکانسی ۸۰-۴۰ مگاهرتز است. هدف اصلی SURA، آشکارسازی رادیویی و تعیین پارامترهای مهم پرتو کیهانی است. تا کنون جهت ورود پرتوهای کیهانی با توجه به شکل الگوی رادیویی و همچنین هسته بهمن پرتوهای کیهانی که محل برخورد محور بهمن با زمین است توسط این آرایه مورد مطالعه قرار گرفته است [۲، ۳]. یکی دیگر از پارامترهای بسیار مهم پرتو کیهانی، انرژی اولیه پرتو کیهانی است. تعیین انرژی اولیه بسیار حائز اهمیت است زیرا می‌تواند ما را در پیدا کردن منابع احتمالی پرتو کیهانی و دیگر مشخصات آن مانند عمق بیشینه (X_{Max}) یاری رساند. رصدخانه Tunka-Rex، AERA و CODALEMA با استفاده از تابع توزیع عرضی (LDF) انرژی پرتوهای کیهانی را بدست می‌آورند و ثابت می‌کنند که شدت میدان الکتریکی در یک فاصله بهینه از محور بهمن با انرژی اولیه پرتو کیهانی متناسب است [۴، ۵، ۶]. در اینجا روش جدیدی برای بازسازی انرژی اولیه پرتوهای کیهانی با بیشینه خطای حدود ۱۴٪ پیشنهاد می‌شود. بدین منظور، ابتدا شبیه سازی‌های انجام شده با استفاده از کُد CoREAS را شرح می‌دهیم. سپس به بیان روش تعیین انرژی اولیه که بر پایه نسبت متوسط شدت میدان الکتریکی شبیه سازی شده به متوسط شدت میدان الکتریکی تجربی است می‌پردازیم. در بخش بعد، خطای تعیین انرژی را با استفاده از این روش محاسبه می‌کنیم و در آخر نتایج کلی را بیان می‌کنیم.

پارامترهای شبیه سازی

در این بخش با بهره گیری از کُد CoREAS، به شبیه سازی پرتوهای کیهانی دریافتی توسط آرایه رادیویی SURA می پردازیم. بدین منظور، مختصات محل آنتن ها، ارتفاع از سطح دریا (۱۱۳۰ متر) و مولفه های میدان مغناطیسی ($B_x=28.09 \mu T$ و $B_y=39.43 \mu T$) در محل آرایه SURA به صورت ورودی به برنامه داده می شود. بطور کل، ۷ دسته شبیه سازی با ذره اولیه پروتون و جهت فرود با زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$ در محدوده انرژی 10^{14} eV تا $7 \times 10^{14} \text{ eV}$ انجام می شود که هر دسته شامل ۱۶۹ بهمن هوایی در ۱۶۹ محل متفاوت هسته بهمن است. تعداد کل شبیه سازی های انجام شده ۱۱۸۳ است. علاوه بر آن، به منظور محاسبه عامل مقیاس و تعیین انرژی اولیه، یک آرایه بسیار چگال با تعداد ۱۲۳۲۱ آنتن که در فواصل یک متری از یکدیگر واقع شده اند در انرژی $2 \times 10^{14} \text{ eV}$ و زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\phi = 40^\circ$ شبیه سازی شده است.

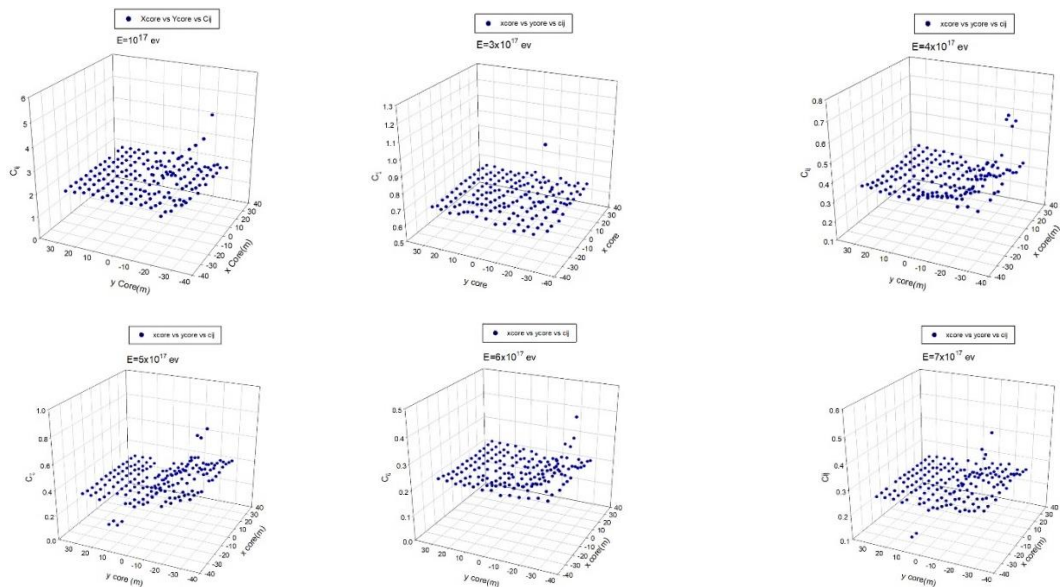
روش تعیین انرژی اولیه پرتو کیهانی

روشی که به منظور تعیین انرژی اولیه پرتوهای کیهانی ارائه می دهیم بر پایه مقایسه شدت سیگنال رادیویی شبیه سازی و شدت سیگنال رادیویی تجربی است. در واقع با بهره گیری از عامل مقیاس (scale factor) که نسبت میانگین شدت سیگنال شبیه سازی به شدت سیگنال تجربی است می توان انرژی اولیه پرتوهای کیهانی را مشخص نمود. عامل مقیاس (C_{ij}) اولین بار در رابطه χ^2 در مقاله [۷] به منظور تعیین موقعیت هسته بهمن معرفی شد.

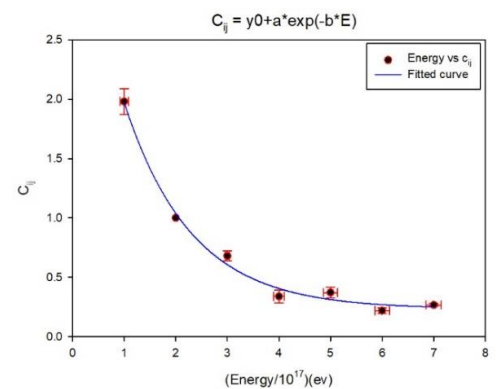
$$\chi_{ij}^2 = \chi^2(x_i, y_j) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \left(\frac{\frac{E_{sim}^{ijk} - E_{exp}^k}{C_{ij}}}{E_{exp}^k} \right)^2 \quad (1)$$

که در روابط بالا $C_{ij} = \frac{\bar{E}_{sim}}{\bar{E}_{exp}}$ عامل مقیاس و میانگین شدت سیگنال آنتن های شبیه سازی شده $\bar{E}_{sim}$ به سیگنال آنتن های تجربی $\bar{E}_{exp}$ (در اینجا ۴ آنتن) است. ابتدا نشان می دهیم که روش پیشنهادی ما به موقعیت هسته بهمن بستگی ندارد و ما بدون دانستن هسته می توانیم مستقلاً انرژی اولیه را تعیین کنیم. در شکل ۱ نمودار عامل مقیاس بر حسب موقعیت هسته بهمن رسم شده است. هر نمودار در این شکل در یک انرژی ثابت پرتو اولیه اما موقعیت های متفاوت هسته بهمن است. همانطور که مشاهده می شود عامل مقیاس های بدست آمده در هر مرحله از شبیه سازی برای ۱۶۹ هسته بهمن به موقعیت هسته بهمن بستگی ندارد و تمامی نقاط تقریباً روی یک صفحه واقع شده اند. بنابراین می توان نتیجه گرفت که عامل مقیاس به هسته بهمن بستگی ندارد. سپس در هر انرژی با

زاویه سروسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\varphi = 40^\circ$ و در ۱۶۹ محل هسته بهمن متفاوت در موقعیت $-30 < x < 30$ و $-30 < y < 30$ متر با فواصل ۵ متر شبیه سازی برای آنتن های SURA انجام و با مقایسه آن با داده های آرایه چگال مقدار عامل مقیاس (C_{ij}) برای هر شبیه سازی تعیین و میانگین ۱۶۹ شبیه سازی به عنوان عامل مقیاس برای انرژی مربوطه تعیین شد. نتایج برای انرژی های متفاوت در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱: نمودار عامل مقیاس بر حسب موقعیت ۱۶۹ هسته بهمن هوایی پرتو کیهانی



شکل ۲: نمودار انرژی اولیه بر حسب عامل مقیاس.

در شکل ۲ بطور واضح می توان دید انرژی اولیه پرتو کیهانی متناسب با عامل مقیاس است و با افزایش انرژی اولیه پرتو کیهانی عامل مقیاس کاهش پیدا می کند. به بیان دیگر، با افزایش انرژی پرتو کیهانی اولیه نسبت به انرژی

آرایه چگال شبیه سازی شده ($2 \times 10^{17} \text{eV}$) سیگنال تجربی $\bar{E}_{exp}$ از سیگنال $\bar{E}_{sim}$ بزرگتر و در نتیجه عامل مقیاس کوچکتر می شود. همانطور که در شکل ۲ دیده می شود C_{ij} برای رویدادهای تجربی که انرژی آنها با انرژی آرایه چگال ($2 \times 10^{17} \text{eV}$) مساوی باشد برابر با یک، در انرژی های کمتر از انرژی آرایه چگال، بزرگتر از یک و در انرژی های بزرگتر عامل مقیاس کوچکتر از یک است. در مرحله بعد با برازش داده ها رابطه بین انرژی اولیه و عامل مقیاس بصورت زیر بدست آمد.

$$C_{ij} = y_0 + a e^{-bE} \quad (2)$$

که در آن a ، b و y_0 پارامترهای برازش $a = 3/76$ و $b = 0/77$ و $y_0 = 0/23$ می باشند.

محاسبه خطای روش تعیین انرژی اولیه

با استفاده از معادله برازش نمودار انرژی بر حسب عامل مقیاس (معادله ۲) و با مشتق گیری از رابطه می توان میزان خطای این روش را محاسبه نمود.

$$\Delta E = - \frac{10^{17} \times \Delta C_{ij}}{a.b e^{-b \frac{E}{10^{17}}}} \quad (3)$$

در شبیه سازی های انجام شده انحراف معیار عامل مقیاس ΔC_{ij} برای ۱۶۹ بهمن هوایی پرتوکیهانی با انرژی eV 7×10^{17} برابر $0/0136$ بدست آمد. با جایگزاری این مقدار و مقادیر ثابت a و b میزان خطای نسبی روش تعیین انرژی اولیه ۱۴٪ محاسبه می شود. کمترین خطای نسبی برای انرژی $3 \times 10^{17} \text{eV}$ حدود ۴٪ و بیشترین خطا مربوط به انرژی $7 \times 10^{17} \text{eV}$ در حدود ۱۴٪ بدست آمد. واضح است که با دور شدن از انرژی آرایه چگال یعنی $2 \times 10^{17} \text{eV}$ خطا افزایش می یابد.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{0/98 \times 10^{17}}{7 \times 10^{17}} = \%14 \quad (4)$$

نتیجه گیری

در این مقاله رویکردی نوین بر اساس مقایسه میانگین شدت سیگنال رادیویی شبیه سازی و شدت سیگنال رادیویی تجربی جهت بدست آوردن انرژی اولیه پرتو کیهانی که یکی از اصلی ترین مشخصات پرتوکیهانی است، ارائه شد. در گام نخست، تعداد ۱۱۸۳ بهمن هوایی در محدوده انرژی 10^{17}eV تا $7 \times 10^{17} \text{eV}$ و یک آرایه چگال با

جهت فرودی با زاویه سرسویی $\theta = 35^\circ$ و زاویه سمتی $\varphi = 40^\circ$ در موقعیت آرایه رادیویی SURA شبیه سازی شد و مقادیر میانگین عامل مقیاس برای هر دسته شبیه سازی ۱۶۹ تایی در هر انرژی محاسبه شد. سپس نشان دادیم که این روش مستقل از موقعیت هسته بهمن است و با انرژی اولیه پرتو کیهانی ارتباط دارد و در نهایت انرژی اولیه پرتو کیهانی را با بهره گیری از این روش با خطایی بین ۴ تا ۱۴ درصد محاسبه کردیم.

مرجع ها

- [1] A. D. Supanitsky, "Determination of the Cosmic-Ray Chemical Composition: Open Issues and Prospects", arXiv:2212.11695v1 [astro-ph.HE] (2022) 1-2
- [2] M. Sabouhi, G. Rastegarzadeh, "Dependence of radio signal properties on the arrival direction of Cosmic rays", in *physics conference of Iran* (1396) 2-4
- [3] M. Sabouhi, G. Rastegarzadeh "Dependence of normalized phase angle of cosmic ray radio signals on core location of an extensive air shower", *Iranian Journal of Physics Research*, Vol. 21, No. 3, (2021) 3-9
- [4] D. Kostunina, P.A. Bezyazeev, R. Hillera, F.G. Schroder, V. Lenokb, E. Levinsonb, "Reconstruction of air-shower parameters for large-scale radio detectors using the lateral distribution", arXiv:1504.05083v2 [astro-ph.HE] (2015) 5-6
- [5] Q.D Hasankiadeh for the Pierre Auger Collaboration, "Advanced Reconstruction Strategies for the Auger Engineering Radio Array", arXiv:1705.06230v1 [astro-ph.IM] (2017) 2-3
- [6] F. Gatéa*, R. Dalliera, L. Martina, B. Revenu "Reconstruction of the parameters of cosmic ray induced extensive air showers using radio detection and simulation", In *ICRC No. 397* (2015) 6-7
- [7] S.F. Aghajanpour, M. Sabouhi, G. Rastegarzadeh "Extensive air shower core determination using cosmic ray radio signal", 14th National conference on Astronomy and Astrophysics