



تعیین هسته های بهمن های گسترده هوایی با استفاده از امواج رادیویی پرتوهای کیهانی

سیده فاطمه اقاچانپور میر^{۱،۲}، محمد سبوحی^{۱،۲}، گوهر رستگارزاده^{۱،۲}

^۱ دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان

^۲ آرایه رادیویی دانشگاه سمنان (SURA)

چکیده

با ارائه روشی مبتنی بر استفاده از یک آرایه مجازی چگال، هسته های بهمن های هوایی شبیه سازی شده در سه بازه انرژی 10^{17} و 5×10^{17} و 7×10^{17} الکترون ولت را تعیین و خطای آن را بدست آورده ایم. این روش را در مورد داده های تجربی آرایه SURA، بکاربرده و محل هسته های بهمن را برای آنها بدست آورده ایم.

Extensive air shower core determination using cosmic ray radio signal

S.F. Aghajanpour^{1,2}, M. Sabouhi^{1,2}, G. Rastegarzadeh^{1,2}

¹ Department of Physics, Semnan University, Semnan

² Semnan University Radio array (SURA)

Abstract

In this study, we present a method based on using a dense virtual radio array to obtain the core position of simulated air showers with 10^{17} , 5×10^{17} and 7×10^{17} eV energies and investigate the accuracy of this method. We applied this approach to the SURA experimental data to determine shower core positions of possible cosmic ray candidates.

مقدمه

پرتوهای کیهانی ذرات باردار پرانرژی هستند که منابع آنها بیرون از کره زمین و حتی در انرژیهای بالاتر از 10^{18} eV در بیرون از کهکشان راه شیری هستند. این پرتوها هنگام عبور از جو زمین بهمن های گسترده هوایی حاوی ذرات باردار، نور چرنکوف، نور فلورسنت و امواج رادیویی ایجاد میکنند که آرایه های آشکارساز زمینی قادر به ثبت آنها هستند. سپس با مطالعه و تحلیل این ذرات و تابش های ثانویه جهت، انرژی و جنس پرتو کیهانی اولیه تعیین میشود. محل برخورد محور بهمن با سطح زمین را هسته بهمن (core) می نامیم. تعیین محل هسته بهمن برای بدست آوردن تابع توزیع عرضی و انرژی پرتو اولیه ضروری است. در آشکارسازهایی که ذرات ثانویه را آشکارسازی می کنند با برازش چگالیهای تجربی با توابع توزیع عرضی نظری مانند NKG، محل هسته بهمن بدست می آید. استفاده از این روش مستلزم دانستن تعداد دقیق ذرات رسیده به هر آشکارساز است که اغلب به دلایل اقتصادی و فنی کار ساده ای نیست. با توجه به اینکه در حال حاضر آرایه رادیویی دانشگاه سمنان (SURA) با استفاده از ۴ آنتن LPDA مشغول به ثبت امواج رادیویی پرتوهای کیهانی است [۱]، در کار حاضر روش جدیدی را برای تعیین محل هسته بهمن در آشکارسازهای رادیویی ارائه میکنیم و این روش را در مورد داده های تجربی آرایه SURA بکار میبریم.

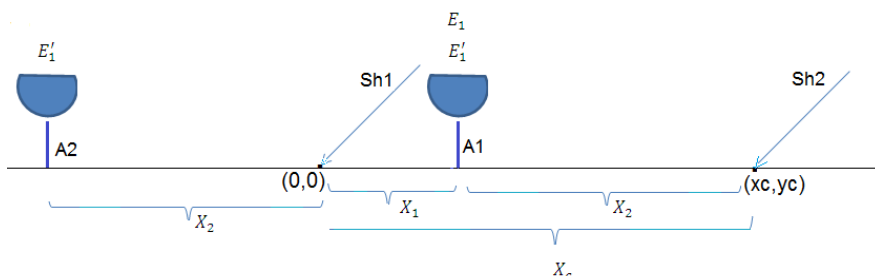
تعیین هسته بهمن

در شکل ۱ بهمن هوایی شماره ۱ (Sh1) که هسته آن درست در محل مرکز آرایه یعنی (0,0) قرار دارد با جهت ورود مشخصی به زمین برخورد کرده است. آنتن شماره ۱ (A1) سیگنال رادیویی E_1 را از این بهمن دریافت میکند. حال بهمن هوایی شماره ۲ (Sh2) که هسته آن در (x_c, y_c) قرار

دارد با همان جهت ورود به آرایه برخورد میکند. واضح است که در این حالت آنتن شماره ۱ سیگنال متفاوتی را نسبت به حالت قبل دریافت میکند. که شدت آن را E'_1 مینامیم. حال آنتن دوم A_2 که آن را آنتن مجازی آنتن اول برای هسته (x_c, y_c) مینامیم در محل: $x_2 = x_1 - x_c$ و $y_2 = y_1 - y_c$ در نظر بگیرید. با توجه به فواصل نشان داده شده در شکل ۱ واضح است که اگر بهمن شماره ۱ با هسته $(0,0)$ به آرایه برخورد کند این آنتن همان مقدار E'_1 را دریافت میکند. پس سیگنالهای رسیده از بهمنی با هسته (x_c, y_c) به هر آنتن همان سیگنالهای رسیده از بهمنی با هسته $(0,0)$ به آنتن مجازی آن آنتن است. با استفاده از این ایده برای پیدا کردن هسته بهمن کافی است برای آرایه بسیار چگال (با تعداد آنتن زیاد) در جهت تابش مورد نظر و انرژی دلخواه و هسته بهمن $(0,0)$ شبیه سازی انجام شود و با برازش سیگنالهای این آنتن های مجازی با داده های تجربی، هسته بهمن با مینیمم کردن χ^2 از رابطه (۱) بدست می آید [۲].

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

ضریب C_{ij} که عامل مقیاس (Scale factor) نامیده میشود. نسبت میانگین سیگنال های شبیه سازی شده به میانگین سیگنالهای تجربی است. چون در این روش هنگام تعیین هسته عملاً از انرژی پرتو اولیه بی خبر هستیم و ممکن است سیگنال شبیه سازی با سیگنال تجربی به لحاظ مقدار متفاوت باشد، با وارد کردن این عامل این دو سیگنال را به هم نزدیک میکنیم. واضحاً اگر شبیه سازی آرایه چگال برای انرژی کمتری نسبت به انرژی پرتو کیهانی اولیه انجام شده باشد یعنی $E_{ijk}^{sim} < E_k^{exp}$ باشد $C_{ij} < 1$ و در غیر اینصورت $C_{ij} > 1$ میشود.



شکل ۱: سیگنال های دریافت شده توسط آنتن های مجازی.

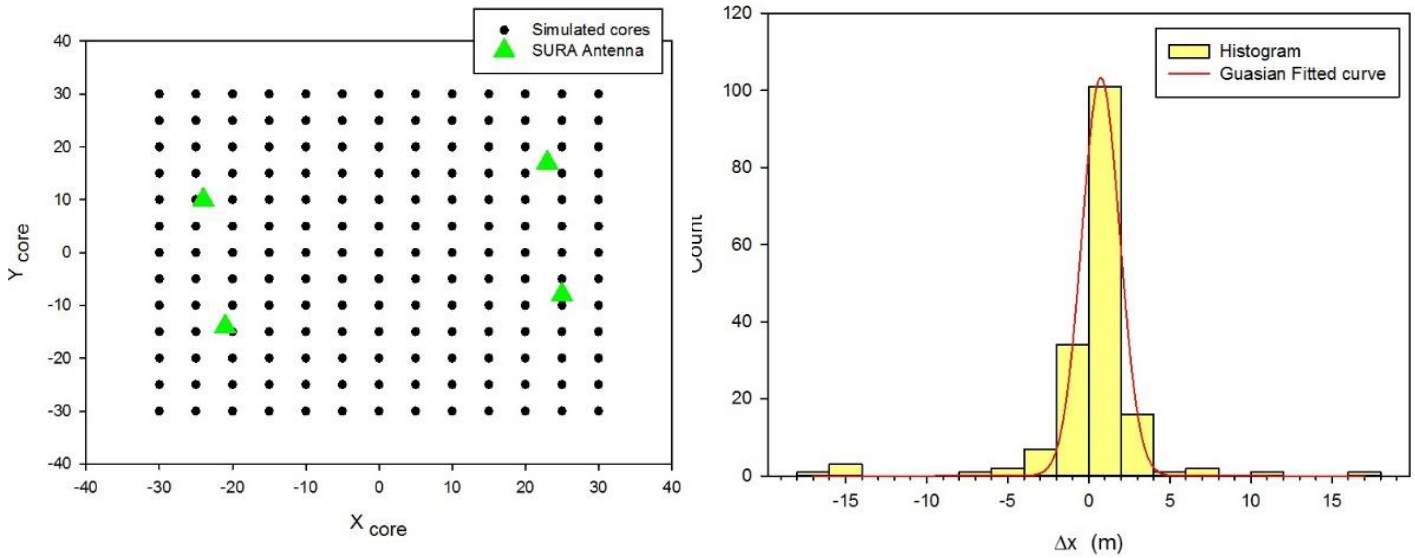
شبیه سازی

با استفاده از کُد CoREAS 1.4 شبیه سازی برای آرایه مجازی بسیار چگال، با تعداد ۱۲۳۰۰ آنتن که در $60 \leq x \leq 60$ m و $60 \leq y \leq 60$ m در یک آرایه مربعی قرار گرفته بودند در انرژی 2×10^{11} eV (آرایه SURA بیشترین بازده ثبت بهمن های هوایی را در انرژی 2×10^{11} eV دارد [۱]). برای یک پرتو کیهانی اولیه پروتون با هسته $(0,0)$ در ارتفاع ۱۱۳۰ m از سطح دریا (سمان) و میدان مغناطیسی این محل انجام شد. این شبیه سازی در دو زاویه تابش $\varphi = 0$ و $\theta = 0$ و زاویه تابش $\varphi = 40^\circ$ و $\theta = 35^\circ$ که بیشترین داده های تجربی را در این جهت آشکارسازی کرده بودیم [۳]، برای ۱۲۳۰۰ آنتن که به فاصله ۱ m از همدیگر در یک آرایه مربعی قرار گرفته بودند انجام شد.

اعتبار روش

برای آزمودن اعتبار روش تعداد ۱۶۹ بهمن در هر انرژی با هسته های متفاوت برای ۴ آنتن آرایه SURA در سه بازه انرژی 10^{11} و 5×10^{11} eV

و 7×10^{17} eV الکترون ولت که کاملاً متفاوت با انرژی 2×10^{17} eV مربوط به آرایه چگال بود، شبیه سازی شدند. در ابتدا از نتایج شبیه سازی برای آرایه مجازی چگال در انرژی 2×10^{17} eV و زاویه تابش $\theta = 0$ و $\phi = 0$ با هسته (0,0) استفاده کردیم و بجای داده های تجربی، شبیه سازی برای آرایه SURA در انرژی 10^{17} eV و زاویه تابش $\theta = 0$ و $\phi = 0$ ولی در هسته های متفاوت شکل ۲ (چپ) را مورد آزمون قرار دادیم. همانطور که در شکل ۲ (راست) دیده میشود پهنای منحنی گاوسی برازش شده یا همان مقدار خطا در محاسبه مکان X هسته یعنی Δx ، $2/6m$ بدست آمده است. منحنی های مشابهی برای Δy و Δr بدست آوردیم که به دلیل کمبود جا قادر به نمایش آنها نیستیم اما نتایج آنها را در جدول ۱ ثبت کرده ایم.



شکل ۲: چپ: محل هسته های بهمن های شبیه سازی شده (دایره سیاه) و مختصات آنتن های SURA (مثلث های سبز رنگ). راست: هیستوگرام خطا در یافتن مختصه X بهمن ها به همراه منحنی گاوسی برازش شده.

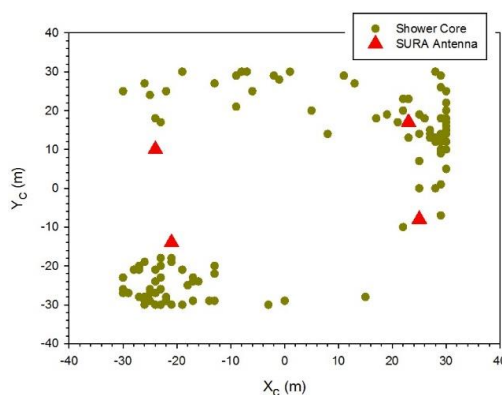
همانطور که اشاره شد آرایه SURA بیشترین داده های تجربی را در زاویه تابش $\theta=35^\circ$ و $\phi=40^\circ$ آشکارسازی کرده است [۳]. بنابراین در این مرحله از آرایه چگال دوم در انرژی 2×10^{17} eV و زاویه تابش $\theta=35^\circ$ و $\phi=40^\circ$ با هسته (0,0) استفاده کردیم و بجای داده های تجربی، داده های شبیه سازی شده برای آنتن های SURA در انرژی 10^{17} eV و زاویه تابش $\theta=35^\circ$ و $\phi=40^\circ$ ولی در هسته های متفاوت شکل ۲ (چپ) را مورد آزمون قرار دادیم. در ادامه این آزمون را برای دو بازه انرژی دیگر تکرار کردیم و از برازش داده ها با منحنی های گاوسی خطاها را محاسبه و نتایج را در جدول ۱ نشان داده ایم.

جدول ۱: خطا در اندازه گیری مختصات هسته بهمن در انرژی ها و زوایای تابش مختلف.

7×10^{17} eV			5×10^{17} eV			10^{17} eV			زاویه تابش
$\Delta r(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta x(m)$	$\Delta r(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta x(m)$	$\Delta r(m)$	$\Delta y(m)$	$\Delta x(m)$	
۱۴/۶	۱۰/۶	۸/۹	۸/۳	۶/۶	۵/۳	۶/۳	۶/۰	۲/۴	$\phi=0^\circ, \theta=0^\circ$
۹/۹	۹/۶	۱۳/۶	۷/۶	۶/۶	۱۰/۶	۷/۱	۶/۰	۶/۸	$\phi=40^\circ, \theta=35^\circ$

تحلیل داده های تجربی

علیرغم اعمال شرط های مختلف تریگر و انتخاب پالس بر روی داده های تجربی [۳] برای اطمینان از صحت نسبت دادن رویدادهای مشاهده شده به پرتو کیهانی، تا زمان اعمال تریگر خارجی ذرات که متشکل از سه دکتور سیتیلاتور است و همزمانی ورود ذرات و امواج رادیویی را به عنوان شرط تریگر در نظر میگیرد (سه دکتور خریداری شده و در آینده نزدیک استفاده خواهد شد)، ما رویدادهای ثبت شده را بعنوان کاندید پرتو کیهانی و نه لزوماً پرتو کیهانی، مینامیم. برای این رویدادها با اعمال پاسخ آنتن و الکترونیک [۴] رویدادهای رسیده به آنتن ها ثبت و ابتدا جهت ورودی آنها با استفاده از زمان رسیدن آنها تعیین و سپس برای رویدادهایی که جهت ورود آنها در بازه $34^{\circ} \leq \theta \leq 36^{\circ}$ و $38^{\circ} \leq \varphi \leq 42^{\circ}$ بود با استفاده از روش بالا محل هسته های بهمن را بدست آوردیم. نتایج در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: هسته های بهمن های آشکارسازی شده برای رویدادهای ثبت شده در آرایه SURA (دایره های توپر) و مختصات آنتن های SURA (مثلث های قرمز).

نتیجه گیری

با شبیه سازی یک آرایه مجازی چگال در جهت ورود داده های تجربی و هر انرژی اولیه دلخواه با هسته بهمن $(0,0)$ میتوان با دانستن جهت ورود هر پرتو کیهانی اولیه و بدون دانستن انرژی آن، محل هسته بهمن را تعیین کرد. محدودیت روش در این است که برای هر جهت یا بازه ای از جهت های ورودی باید یک آرایه چگال در آن جهت ساخت. محدودیت دوم روش این است که اگر انرژی آرایه چگال با انرژی داده تجربی تفاوت خیلی زیادی داشته باشد، دقت روش کم میشود. خوشبختانه ضرایب G_{ij} در اینجا کمک کننده هستند و اگر مقادیر آنها بسیار دور از مقدار یک بود میتوان انرژی اولیه آرایه چگال را آنقدر تغییر داد تا ضرایب به یک نزدیک شوند، در اینصورت انرژی آرایه چگال و داده های تجربی به همدیگر نزدیک و دقت بالا میرود. در آینده با استفاده از توزیع ضرایب G_{ij} به تخمین انرژی داده های تجربی خواهیم پرداخت.

مراجع

- [1] G. Rastegarzadeh, , and M. Sabouhi. "SURA: Semnan University Radio Array " ; *Experimental Astronomy* 49, No. 1 (2020) 21-41.
- [2] F. Gatéa et al., "Reconstruction of the parameters of cosmic ray induced extensive air showers using radio detection and simulation" In: "Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015). 30 July - 6 August, 2015. The Hague, The Netherlands. Online at <http://pos.sissa.it/cgi-bin/reader/conf.cgi?confid=236>, id.397
- [3] M. Sabouhi and G. Rastegarzadeh,; "SURA-4; First set of experimental data analysis"; In: *Proceedings of Iranian Annual Physics Conference* , Kermanshah , Iran, (2020) 752-757
- [4] M. Mostafavi Alhosseini et al., "SURA-4; System Calibration Process in SURA Experiment"; In: *Proceedings of Iranian Annual Physics Conference* , Kermanshah , Iran, (2020) 139-142