

Using the time structure of extensive air showers for cosmic ray mass discrimination

Gohar Rastegarzadeh*, Hossein Abbasnejad

Faculty of Physics, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 17.07.2019 Final revised: 01.01.2019 Accepted: 28.12.2019

DOI: 10.22055/jrmbms.2020.15333

Abstract

In this research, using CORSIKA simulation code with QGSJETII04 and GHEISHA2002d as high and low energy interaction models respectively, proton and iron cosmic ray primaries with 10^{17} eV energy and 20-60° zenith angle are simulated at Tehran observation level (1200m above sea level). By using azimuth angle, arrival time and local coordinates of the muon and electron secondaries as well as rise times of received pulses are calculated. By investigating the rise time as a function of the distance to the Shower Core for different azimuth angle, it is shown that there is an azimuthal asymmetry in the rise time distribution which can be used for mass discrimination of primary cosmic rays.

Keywords: Cosmic Ray, Extensive air shower, Rise time azimuthal asymmetry, Cosmic ray mass discrimination

*Corresponding Author: grastegar@semnan.ac.ir



استفاده از ساختار زمانی بهمن‌های گسترده هوایی جهت تفکیک جرمی پرتوهای کیهانی

گوهر رستگارزاده*، حسین عباس نژاد

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

دریافت: 1398/04/26 ویرایش نهایی: 1398/06/10 پذیرش: 1398/10/07

DOI: 10.22055/jrmbms.2020.15333

چکیده

در کار حاضر پرتوهای کیهانی پروتون و آهن در انرژی 10^{17} الکترون ولت و زاویه‌های سرسویی 20° تا 60° با استفاده از کُد CORSIKA و مدل‌های اندرکنشی انرژی‌های بالا (QGSJETII04) و مدل‌های اندرکنشی انرژی پایین GHEISHA2002d و در ارتفاع 1200 متر از سطح دریا (تهران) شبیه‌سازی شده‌اند. و با ثبت زاویه سمتی، مکان و زمان رسیدن ذرات ثانویه نتایج شبیه‌سازی تحلیل و زمان‌خیز (rise time) ذرات ثانویه (الکترون‌ها و میون‌ها) محاسبه شده است. با بررسی وابستگی زمان‌خیز به‌فاصله از محور بهمن و زاویه سمتی ما نشان داده‌ایم در توزیع سمتی زمان‌خیز عدم تقارنی وجود دارد که می‌تواند برای تفکیک جرمی پرتوهای اولیه مورد استفاده قرار بگیرد.

کلیدواژگان: پرتو کیهانی، بهمن گسترده هوایی، عدم تقارن سمتی زمان‌خیز، تفکیک جرمی پرتو کیهانی

مقدمه

نتیجه مطالعه همبسته طیف انرژی و ترکیب جرمی

می‌تواند به فهم علت این ساختارها کمک کند.

در حال حاضر اندازه‌گیری انرژی و جهت پرتوهای کیهانی از روی زمان رسیدن و تعداد ذرات ثانویه در سطح مشاهده با دقت قابل قبولی انجام می‌شود. اما تعیین ترکیب جرمی هنوز مسئله حل نشده و چالش برانگیز مهمی در پرتوهای کیهانی می‌باشد.

همان‌طور که می‌دانیم مشخصات پرتوهای کیهانی (جرم، انرژی و جهت) تا انرژی 10^{13} الکترون‌ولت به‌طور مستقیم به‌وسیله بالون یا ماهواره اندازه‌گیری می‌شوند. اما در انرژی‌های بالاتر پرتوهای کیهانی با ورود به‌جو زمین تولید بهمن‌های گسترده هوایی می‌کنند و فقط درصد کمی از ذرات ثانویه این بهمن‌ها توسط آرایه‌های

بدون شک تعیین ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی می‌تواند قدم بزرگی در حل معمای یافتن منابع پرتوهای کیهانی باشد. توزیع جرمی و در نتیجه تعیین توزیع بار الکتریکی این پرتوها می‌تواند فرضیه‌های موجود در مورد مکانیزم‌های شتاب‌دهی و انتشار پرتوهای کیهانی در داخل کهکشان و بیرون کهکشان را رد یا اثبات نماید. مخصوصاً در اطراف زانو (انرژی 5×10^{15} eV) و قوزک (انرژی 5×10^{18} eV) یعنی نقاطی که طیف انرژی ساختار دارد، اندازه‌گیری ترکیب جرمی مهم است. همچنین شواهد تجربی نشان می‌دهد که در انرژی‌های بیشتر از $10^{19/5}$ که افت شار به‌خاطر اثر GZK اتفاق می‌افتد ترکیب جرمی تغییر می‌کند [1]. در

*نویسنده مسئول: grastegar@semnan.ac.ir

متفاوتی را تا هنگام رسیدن به سطح مشاهده طی می‌کنند. این تفاوت منجر به ایجاد عدم تقارن سمتی در زمان خیز پالس‌های دریافتی توسط آشکارسازها می‌گردد. وجود عدم تقارن سمتی در پالس‌های زمانی ذرات ثانویه اولین بار در آرایه Haverah Park [11] و سپس در پالس‌های زمانی نور چرنکوف تولید شده توسط ذرات ثانویه در هنگام عبور از آشکارسازهای چرنکوف آبی دیده شد [12]. این عدم تقارن همچنین اخیراً در رصدخانه پیراوزه¹ نیز مشاهده شده است [13]. این رصدخانه به دلیل سطح بزرگ و قدرت تفکیک زمانی بالا در الکترونیک، توانایی بررسی این عدم تقارن در زاویه‌های بزرگ را دارد [14].

اهمیت بررسی عدم تقارن سمتی در این است که چون میزان این عدم تقارن به عمق اتمسفری پیموده شده توسط ذرات بستگی دارد، هنگامی که پرتوهای کیهانی اولیه با زاویه تابش و انرژی اولیه یکسان مورد مطالعه قرار می‌گیرند میزان عدم تقارن در این پرتوها به جرم پرتوی اولیه بستگی پیدا می‌کند. در واقع پرتوهای کیهانی با جرم‌های مختلف دارای توسعه طولی متفاوتی در جو بوده و در نتیجه متحمل عدم تقارن‌های متفاوتی می‌شوند. پس با مطالعه عدم تقارن سمتی در زمان خیز پالس‌ها می‌توان به اطلاعاتی در مورد ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی نیز دست یافت. در کار حاضر به مطالعه این عدم تقارن و رابطه آن با جرم اولیه پرتو کیهانی پرداخته‌ایم.

محاسبه زمان خیز

اگر Γ مکان ذره ثانویه و ϕ زاویه سمتی آن نسبت به محل هسته بهمن باشد (زاویه سمتی صفر زاویه سمتی اولین ذره رسیده به زمین است)، زمان خیز پالس

زمینی ثبت می‌شوند. در نتیجه عدم دقت در تعیین ترکیب جرمی بیشتر خواهد بود.

مشاهدات تجربی نشان می‌دهد که در انرژی‌های بین 10^{15} تا 10^{17} الکترون‌ولت با افزایش انرژی، ترکیب جرمی سنگین‌تر می‌شود اما از حدود انرژی 10^{17} eV تا ناحیه قوزک یعنی انرژی $10^{18/5}$ eV طیف سبک می‌شود. در انرژی‌های بالاتر از 10^{19} الکترون‌ولت به دلیل کمبود داده‌های تجربی نتایج متناقض بوده و بعضی آزمایش‌ها سنگین شدن ترکیب جرمی در این نواحی [2-4] و عده‌ای سبک شدن ترکیب جرمی در این انرژی‌ها را پیش‌بینی می‌کنند [5].

از آنجایی که نسبت میون به الکترون برای بهمن‌های هادرونی بیشتر از بهمن‌های پرتو گاما است، جداسازی بهمن‌های پرتوهای گاما (بهمن‌های الکترومغناطیسی) از بهمن‌های هادرونی به سادگی و از روی محتوی میونی آنها صورت می‌گیرد. اما چالش اصلی در تعیین ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی جداسازی بهمن‌های هادرونی از یکدیگر است. روش‌های مختلفی برای تفکیک جرمی بهمن‌های هادرونی از یکدیگر وجود دارد که از آن میان می‌توان به استفاده از پارامترهای شبه سرعت میون‌های ثانویه [6]، وابستگی شیب توزیع عرضی به جرم پرتو اولیه [7]، تغییر شیب توزیع عرضی به عنوان تابعی از پارامتر سن بهمن [2]، توزیع عرضی نور چرنکوف ثانویه [8] و اندازه گرفتن مستقیم محل بیشینه بهمن (X_{max}) با استفاده از آشکارسازهای فلورسنت [9] اشاره کرد.

تحلیل تجربی داده‌های پرتو کیهانی زمینی با مطالعه پالس‌های ثبت شده در آشکارسازها انجام می‌شود [10]. ذرات ثانویه پرتوهای کیهانی با جرم و انرژی اولیه یکسان، هنگامی که با زاویه‌های تابش متفاوت با جو زمین اندرکنش می‌کنند، عمق‌های اتمسفری

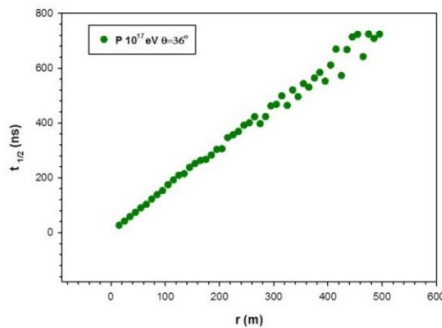
¹ Pierre Auger Observatory

10^{17} eV و زاویه سرسویی 30° به فاصله 5 متری هسته بهمن در زاویه سمتی $\phi = 15^\circ$ ، با توجه به تعریف زمان خیز از روی این شکل این زمان حدود 10/23 ns به دست می‌آید.

بررسی وابستگی تغییرات زمان خیز به فاصله از محور بهمن

در این بخش به بررسی وابستگی زمان خیز به فاصله از محور بهمن پرداخته‌ایم [16].

این رابطه خطی برای اولیه‌های آهن و تمام زوایای سمتی دیگر مورد تحقیق قرار گرفت همان‌طور که در شکل 2 دیده می‌شود به شکل واضحی این رابطه در یک زاویه سمتی ثابت برای تمام α ها خطی است. در ادامه خواهیم دید که چگونه از شیب این خط یعنی $\tau = \frac{t_{1/2}}{r}$ جهت تفکیک جرمی استفاده خواهیم کرد.



شکل 2. تغییرات زمان خیز به عنوان تابعی از فاصله از هسته بهمن در زاویه سمتی 25° ، برای پروتون اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سرسویی 36° .

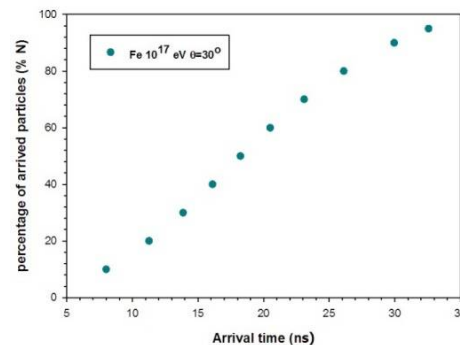
بررسی وابستگی شیب تغییرات زمان خیز با زاویه سمتی

در مرحله قبل برای هر زاویه سمتی یک شیب زمان خیز بر حسب فاصله یعنی یک به دست $\tau = \frac{t_{1/2}}{r}$ آمد. با محاسبه این شیب برای تمام زوایای سمتی دیگر برای هر ذره با هر انرژی اولیه و هر زاویه سرسویی مشخص وابستگی شیب به زاویه سمتی به دست آمد.

$(t_{1/2})$ را به عنوان اختلاف زمانی بین رسیدن 10 و 50 درصد ذرات ثانویه به یک r و ϕ معین بر روی سطح مشاهده تعریف می‌کنیم [15]. برای محاسبه زمان خیز با نوشتن یک برنامه کامپیوتری، درصدهای مختلف رسیدن ذرات محاسبه و زمان خیز برای تمام نقاط به دست آمد.

شکل 1 زمان رسیدن درصدهای مختلف ذرات به مکان 5 متری از هسته بهمن و در زاویه سمتی 15° را نشان می‌دهد. با محاسبه اختلاف زمانی بین رسیدن 10 و 50 درصد ذرات به این نقطه زمان خیز 10/23 ns به دست می‌آید.

ما فاصله 0 تا 600 متر از هسته بهمن را به فواصل 10 متری و همچنین کل 360° زاویه سمتی را نیز به فواصل 10 درجه‌ای تقسیم کردیم یعنی برای هر پروتو ورودی 60×36 محدوده مختلف یعنی 2160 مکان را بررسی کرده زمان خیز را برای ذرات رسیده به این محدوده‌ها محاسبه کردیم. انجام این کار برای اولیه‌های آهن پروتون و زوایای سرسویی مختلف به حجم بزرگی از محاسبه نیاز داشت که با برنامه‌نویسی فرتن این زمان‌ها محاسبه شد.

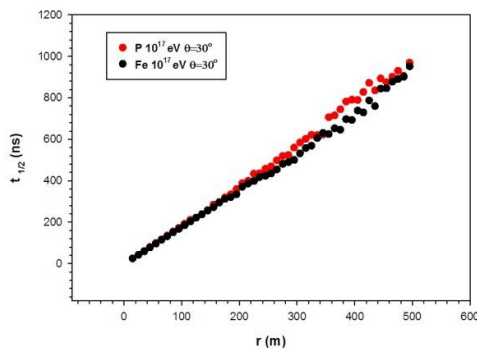


شکل 1. پالس ثبت شده از رسیدن ذرات ثانویه آهن اولیه با انرژی

بررسی قابلیت پارامترهای تفکیک جرمی

در مرحله بررسی توانایی پارامترهای مختلف به دست آمده در بخش‌های قبلی برای تفکیک جرمی آهن از پروتون ابتدا به زمان‌خیز یعنی ($t_{1/2}$) به عنوان یک پارامتر جهت تفکیک جرمی آهن از پروتون نگاه می‌کنیم.

شکل 5 زمان‌خیز آهن و پروتون با انرژی 10^{17} eV و زاویه سرسویی 30° در زاویه سمتی φ برابر با 5° را نشان می‌دهد. در فواصل کم از محور که تعداد ذرات ثانویه زیاد و نوسانات آماری کم است این دو کاملاً همپوشانی دارند و در فواصل بیشتر از 250 متر نیز تفکیک خوبی وجود ندارد پس پارامتر زمان‌خیز $t_{1/2}$ به تنهایی قابلیت جدا سازی آهن از پروتون را ندارد.

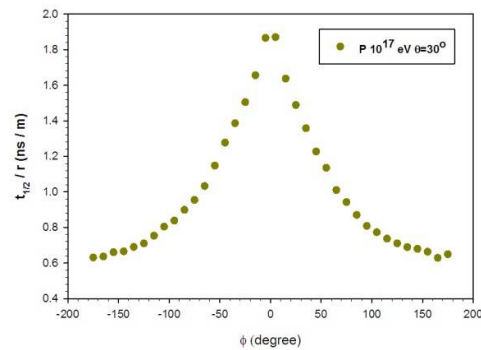


شکل 5. مقایسه تغییرات زمان‌خیز به عنوان تابعی از فاصله از هسته بهمن در زاویه سمتی 5° ، برای پروتون و آهن اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سرسویی 30° .

پارامتر تفکیک جرمی مناسب

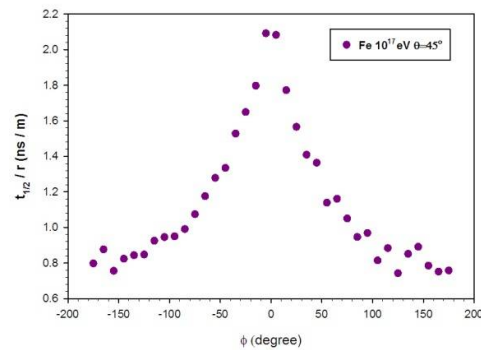
در این بخش در جستجوی یک پارامتر تفکیک جرمی مناسب به جای در نظر گرفتن وابستگی شیب زمان‌خیز به زاویه سمتی φ وابستگی آن به $\cos(\varphi)$ را بررسی می‌کنیم. شکل 6 وابستگی شیب تغییرات زمان‌خیز به $\cos(\varphi)$ را برای آهن اولیه با انرژی

همان‌طور که در شکل 3 برای پروتون اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سرسویی 30° دیده می‌شود با افزایش زاویه سمتی در مقادیر منفی φ شیب زیاد می‌شود و در اطراف $\varphi = 0$ به بیشینه مقدار خود می‌رسد و سپس دوباره کم می‌شود. به طرز جالبی این منحنی تمام فواصل شعاعی ($h\alpha r$) و تمام فواصل سمتی (φ) را برای یک اولیه با انرژی و زاویه سرسویی مشخص را در بر دارد.

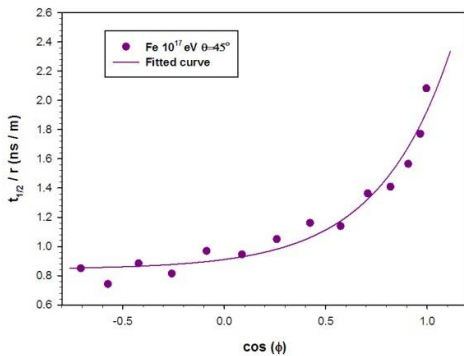


شکل 3. وابستگی شیب تغییرات زمان‌خیز به زاویه سمتی برای پروتون اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سرسویی 30° .

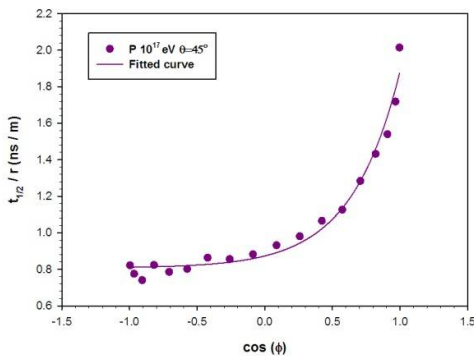
شکل 4 وابستگی شیب زمان‌خیز را برای یک اولیه آهن با انرژی 10^{17} eV و زاویه سرسویی 45° را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شکل کلی توزیع همانند پروتون است.



شکل 4. وابستگی شیب تغییرات زمان‌خیز به زاویه سمتی برای آهن اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سرسویی 45° .



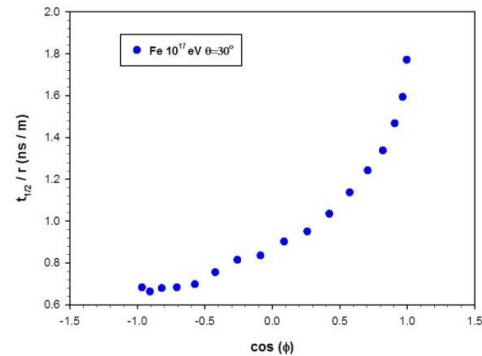
شکل 7. نقاط مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شیب تغییرات زمان‌خیز با $\cos(\phi)$ برای آهن اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سر سویی 45° و خط منحنی حاصل از برازش داده‌ها با تابع معرفی شده در متن می‌باشد. در این مورد $a=0.0084$, $b=0.0067$ به‌دست می‌آید.



شکل 8. نقاط مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شیب تغییرات زمان‌خیز با $\cos(\phi)$ برای پروتون اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سر سویی 45° و خط منحنی حاصل از برازش داده‌ها با تابع معرفی شده در متن می‌باشد. در این مورد $a=0.0807$, $b=0.0066$ به‌دست می‌آید.

با بررسی نسبت $\frac{b}{a}$ برای تمام زوایای سرسویی و اولیه‌های پروتون و آهن مشاهده کردیم که پارامتر $p = \frac{b}{a}$ پارامتر مناسبی جهت تفکیک جرمی می‌باشد. $\left(\frac{b}{a}\right)$ یک کمیت بدون بعد و در واقع مرتبط با شیب منحنی $\left(\frac{t_{1/2}}{r}\right)$ برحسب $\cos(\phi)$ می‌باشد. که از روی پارامترهای برازش به‌دست می‌آید. پس از برازش تمام داده‌ها با این تابع پارامتر p را برای آهن و پروتون در

10^{17} eV و زاویه سر سویی 30° نشان داده شده است. تغییرات یک تابع نمایی افزایشی را نشان می‌دهد.



شکل 6. وابستگی شیب تغییرات زمان‌خیز به $\cos(\phi)$ برای آهن اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سر سویی 30° .

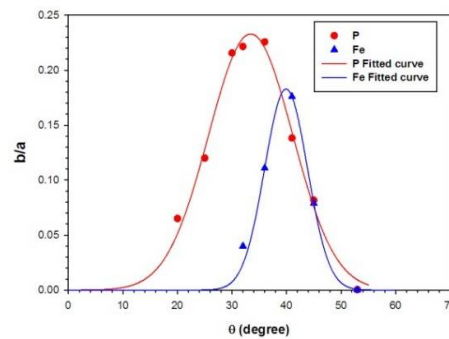
در ادامه سعی کرده‌ایم با برازش داده‌ها فرم تابعی مناسب برای این وابستگی را پیدا کنیم. برازش داده‌ها نشان می‌دهد که نقاط در شکل به‌خوبی با تابع $y = a + be^{cx}$ برازش می‌یابند. در شکل 7 داده‌های شبیه‌سازی برای آهن اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سر سویی 45° و منحنی برازش شده نشان داده شده است. در این مورد $a=0.00844$, $b=0.0067$ به‌دست آمده است و در شکل 8 داده‌های شبیه‌سازی برای پروتون اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سر سویی 45° و منحنی برازش شده نشان داده شده است. در این مورد $a=0.0807$, $b=0.0066$ به‌دست آمده است.

شکل 8 نقاط مربوط به داده‌های شبیه‌سازی شیب تغییرات زمان‌خیز با $\cos(\phi)$ برای پروتون اولیه با انرژی 10^{17} eV و زاویه سر سویی 45° و خط منحنی حاصل از برازش داده‌ها با تابع معرفی شده در متن می‌باشد. در این مورد $a=0.0807$, $b=0.0066$ به‌دست می‌آید.

و جهت ورود ذره اولیه معلوم باشد با توجه به اینکه در حال حاضر جهت و انرژی ذره اولیه به طور مستقل از جرم می‌تواند از روی زمان رسیدن و تعداد کل ذرات مشاهده شده در سطح مشاهده به دست بیاید، به نظر می‌رسد استفاده از این روش در آرایه‌های زمینی آشکار سازی پرتو کیهانی عملی باشد.

در مقایسه این روش با روش‌های دیگر تفکیک جرمی پرتوهای کیهانی که از پارامترهای توزیع عرضی ذرات ثانویه [7] یا آشکارسازی میون‌های پر انرژی در آشکارسازهای میونی زیر زمینی [6] و پارامترهای تصویری آشکارسازهای چرنکوف [8] یا اندازه‌گیری مستقیم محل عمق بیشینه توسط آشکارسازهای فلورسنت [9]، استفاده می‌کنند، با توجه به اینکه در روش ارائه شده در کار حاضر فقط به دانستن زمان رسیدن ذرات به آشکارساز نیاز داریم و با توجه به اینکه می‌دانیم اندازه‌گیری زمان رسیدن ذرات ثانویه اولین و ساده‌ترین داده‌ای است که می‌توان با استفاده از تمام آشکارسازهای ذرات، چرنکوف و فلورسنت و رادیویی به دست آورد، می‌توان این روش را یکی از ساده‌ترین روش‌های تفکیک جرمی پرتوهای کیهانی دانست. از طرفی استفاده از روش توزیع عرضی نیاز به دانستن محل هسته بهمن دارد و به طور کلی پیدا کردن تابع توزیع عرضی از روی تعداد محدود آشکارسازهای ذرات مشکل است. آشکارسازی میون‌های پر انرژی و تفکیک آنها نیاز به آشکارسازهایی در زیر زمین دارد، استفاده از آشکارساز چرنکوف و فلورسنت فقط در شب و به دور از نور ماه امکان پذیر است و بازسازی بهمن از طریق پارامترهای تصویری نور چرنکوف و اندازه‌گیری مستقیم محل عمق بیشینه پیچیدگی‌های خود را دارد.

زوایای سوسویی متفاوت محاسبه کرده و نتایج را در شکل 9 نشان داده‌ایم. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود این پارامتر به خوبی آهن و پروتون را از هم جدا ساخته است. (توجه کنید که در زاویه سوسویی 53° پارامتر p برای آهن و پروتون یکی شده است. در این مورد می‌توانیم از روی محتوی میونی بهمن و مقایسه با شبیه‌سازی، آهن را از پروتون جدا کنیم.) آنچه که در اینجا مهم است وابستگی این پارامتر با زاویه تابش است. در محدوده شبیه‌سازی ما مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه سوسویی (زاویه تابش) پارامتر b/a ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد.



شکل 9. نقاط مربوط به وابستگی پارامتر $p = \frac{b}{a}$ به زاویه سوسویی θ خطوط مربوط به برازش این داده‌ها با تابع مناسب می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در کار حاضر نشان دادیم که استفاده از ساختار زمانی ذرات ثانویه پرتوهای کیهانی از طریق محاسبه زمان خیز در فواصل و زوایای سمتی متفاوت از هسته بهمن می‌تواند منجر به یافتن یک پارامتر تفکیک جرمی مناسب شود. این پارامتر با برازش شیب تغییرات زمان خیز با $\cos(\varphi)$ به دست آمد. نشان دادیم پارامتر $p = \frac{b}{a}$ به خوبی قادر به جداسازی آهن از پروتون می‌باشد. در عمل جهت استفاده از این روش باید انرژی

knee, *International Journal of Modern Physics D* **24** 1 (2015) 1-8.

DOI: [10.1142/S0218271815500108](https://doi.org/10.1142/S0218271815500108)

[7] G. Rastegarzadeh, L. Rafezi Energy, altitude, and mass dependence of steepness of the lateral distribution function of electrons and muons in extensive air showers, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **763** (2014)197–201.

DOI: [10.1016/j.nima.2014.06.055](https://doi.org/10.1016/j.nima.2014.06.055)

[8] C.K. Bhat, R.K. Kaul, M.L Sapru, C.L. Bhat, Cosmic ray mass composition through Cerenkov technique - a feasibility study, *Bulletin of the Astronomical Society of India* **30** (2002) 331-334.

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2018ApJ...858...76A>

[9] R.U. Abbasi (Telescope Array Collaboration), Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid Mode, *The Astrophysical Journal* **858** 2 (2018) 1-27.

DOI: [1003847/1538-4357/aabad7](https://doi.org/10.1088/1538-4357/aabad7)

[10] H. Rebel, G. Volker, M. Foller, A.A. Chilingarian, Arrival time distributions of muons from extensive air showers as signature of the mass composition of cosmic rays, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **21** (1995) 451-472

DOI: [10.1088/0954-3899/21/3/019](https://doi.org/10.1088/0954-3899/21/3/019)

[11] M.D. Ave Pernas, M. Ave, J. Knapp, M. Marchesini, M. Roth, A.A. Watson, Time Structure of the Shower Front as Measured at Haverah Park above 10^{19} eV, *Proceedings of the 28th International Cosmic Ray Conference I* (2003) 349-352.

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2003ICRC....1..349A>

[12] M.T. Dova (Pierre Auger Collaboration), Asymmetries Observed in Giant Air Showers Using Water Cherenkov Detectors, *Proceedings of the 28th*

در ادامه باید شبیه‌سازی‌های این کار در انرژی‌های بالاتر

انجام شود تا وابستگی پارامتر $p = \frac{b}{a}$ به انرژی مورد

بررسی قرار گیرد.

مرجع‌ها

[1] G. Rastegarzadeh, H. Fallahnejad, Investigating Ultra-High Energy Cosmic Rays interactions with cosmic background photons using simulation CRPropa3.0 code, *Journal of Research on Many-body Systems* **8** 17 (2018) 31-39.

DOI: [10.22055/jrmb.2018.13882](https://doi.org/10.22055/jrmb.2018.13882)

[2] S. Doostmohammadi, S.J. Fatemi, An investigation of mass composition of ultra-high energy cosmic rays with energies above 10^{19} eV via the study of extensive air showers, *Serbian Astronomical Journal* **184** (2012) 87–92.

DOI: [10.2298/SAJ1284087D](https://doi.org/10.2298/SAJ1284087D)

[3] A. Yushkov (for the Pierre Auger Collaboration), Mass composition of cosmic rays with energies above $10^{17.2}$ eV from the hybrid data of the Pierre Auger Observatory, *Proceedings of the 36th International Cosmic Ray Conference* **36** (2019) 482-490.

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2019ICRC...36..482Y>

[4] S. Knurenko, I. Petrov, Mass composition of cosmic rays above 0.1 EeV by the Yakutsk array data, *Advances in Space Research* **64** Issue 12 (2019) 2570-2577.

<https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.07.019>

[5] C.H. Jui, Summary of Results from the Telescope Array Experiment, *Proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference* **34** (2015) 35-49

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2015ICRC...34...35J>

[6] G. Rastegarzadeh, M. Nemati, Dependence of the muon pseudorapidity on the cosmic ray mass composition around the

[15] P.K.F. Grieder, *Extensive Air Showers High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, (2010).
<https://www.springer.com/gp/book/9783540769408>

[16] M.T. Dova, M.E. Manceñido, A.G. Mariazzi, H. Wahlberg, F. Arqueros, D. García-Pinto, Study of Rise time as a function of the distance to the Shower Core in the Surface Detector (SD) of the Pierre Auger Observatory, *Journal of Physics: Conference Series* **866** 1 (2017) 1-4.
[DOI:10.1088/17426596/866/1/012003](https://doi.org/10.1088/17426596/866/1/012003)

International Cosmic Ray Conference 1 (2003) 369-372.
<http://ads.nao.ac.jp/abs/2003ICRC....1..369D>

[13] M.T. Dova, M.E. Manceñido, A.G. Mariazzi, H. Wahlberg, F. Arqueros, D. García-Pinto, Time asymmetries in extensive air showers: A novel method to identify UHECR species, *Astroparticle Physics* **31** Issue 4 (2009) 312-319.
[DOI: 10.1016/j.astropartphys.2009.03.001](https://doi.org/10.1016/j.astropartphys.2009.03.001)

[14] D. Nitz [Auger Collaboration], The front-end electronics for the Pierre Auger Observatory surface array, *IEEE Transactions on Nucl. Science* **51** Issue 3 (2004) 413-419.
[DOI: 10.1109/TNS.2004.828507](https://doi.org/10.1109/TNS.2004.828507)