

تعیین ترکیبات جرمی پرتوهای کیهانی با توجه به مؤلفه الکترونی و میونی بالاترین انرژی‌های بهم‌های گسترده هوایی

سمیه سومندر^{۱*}، سید جلیل‌الدین فاطمی^۲ و سعید دوست‌محمدی^۳

^۱ کارشناس ارشد فیزیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

^۲ استاد، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

^۳ دانشجوی دکتری فیزیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران

(دریافت: ۹۰/۶/۳۰، پذیرش نهایی: ۹۲/۲/۲۴)

چکیده

بررسی ترکیبات جرمی با انرژی‌ترین پرتوهای کیهانی یکی از چالش‌های محققان نجوم ذره‌ای است. بررسی پرتوهای کیهانی در این حد انرژی، به علت شمار بسیار کم آنها، خالی از اشکال نیست. در این پژوهش پارامترهای گوناگون بهم‌ها از جمله پارامتر عمر، تعداد کل الکترون‌ها و نیز میون‌ها که مقادیر هر کدام از آنها با در نظر گرفتن توزیع‌های سطحی الکترونی و میونی رابطه نیشیمورا-کاماتا-گرایزن (NKG) محاسبه شده‌اند. به منظور تفکیک جرمی بهم‌ها، مقایسه‌ای از نسبت تعداد کل میون‌ها به الکترون‌ها محاسبه شده که از داده‌های تجربی آرایه‌های یا کوتسک با نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزار کورسیکا که برای ترکیبات جرمی متفاوت عرضه شده است، استفاده می‌شود. مقایسه نتایج حاصل از داده‌های تجربی با نمودارهای شبیه‌سازی شده، افزایش ترکیبات جرمی در گسترده‌ی انرژی‌های بیشتر از $4 \times 10^{19} \text{ eV}$ (حدود انرژی اثر قطع GZK) را نسبت به انرژی‌های کمتر نشان می‌دهد. افزایش ترکیبات جرمی پرتوهای کیهانی اولیه با انرژی، دلالت بر منشأ کهکشانی این پرتوها دارد.

واژه‌های کلیدی: پرتو کیهانی، بهم‌ گسترده هوایی، مولفه میونی، مولفه الکترونی

Identification of mass composition of cosmic rays considering extensive air shower's electron and muon component with highest energies

Soomandar, S.¹, Fatemi S. J.² and Doostmohammadi, S.³

¹M.Sc. in Physics, Faculty of Physics, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

²Professor, Faculty of Physics, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

³Ph.D. Student of Physics, Faculty of Physics, Shahid Bahonar University, Kerman, Iran

(Received: 21 Sep 2011, Accepted: 14 May 2013)

Summary

The phenomena of Extensive Air Shower (EAS) are produced by the collision of primary cosmic rays (CR) with Energy more than 10^{13} eV with the atmospheric molecules. As a result the electron and muon components (cascades) of EAS develop through the air.

The study of such cascades gives important information about the primary CR mass composition as well as its astrophysical origin models. One of the EAS detection methods is by the ground arrays of electron and muon detectors; the data of Yakutsk EAS array located in Russia have been used for primary CR with energy more than 10^{19} eV . In the catalogue of world's data, the EAS parameters such as ρ_e electron density, ρ_μ muon density, R shower core distance, E primary energy and arrival directions (Zenith angle θ ,

E-mail: phsoomandar@gmail.com

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۶۳۰۴۷۹

تلفن: ۰۳۹۲-۴۲۳۴۹۴۶

*نگارنده رابط:

Azimuth angle Φ) of each shower is given.

In this search the different parameters of EAS such as the age parameter, shower size (N_e) and total number of muons (N_μ) are used as mass composition discriminators. The total number of muons and electrons in the shower have been calculated using the lateral distribution functions (LED) of electron and muon of Nishimura-Kamata-Griesen(NKG) formula.

The first sensitive parameter to use is $\frac{N_\mu}{N_e}$ where its dependency on EAS energy is studied. It is expected that the ratio should increase from primary Gamma to proton and then in turn to heavy nucleus. The dependency of calculated $\frac{N_\mu}{N_e}$ on energy shows an increase above 4×10^{19} eV that could be due to LPM effect of Gamma primaries. At highest energies or the increase of Mass composition above this energy, which because of its high increase of $\frac{N_\mu}{N_e}$, heavier mass composition above 4×10^{19} eV is suggested. The second parameter for investigating EAS mass composition is the EAS age parameter which is also calculated by using LDF of NKG formula. Higher age has flatter electron LDF or higher mass composition. Again it is observed that the age is increased (indicating higher mass) above 4×10^{19} eV.

The last main parameter to investigate mass composition is the dependency of N_μ on N_e . The calculated experimental results have been compared with the CORSIKA simulation work for Gamma, Proton(P) and iron(Fe) cosmic ray primaries. The results suggest a mixed P-Fe composition for energies above 10^{19} eV and Fe primaries above 4×10^{19} eV. In conclusion the study of EAS age and $\frac{N_\mu}{N_e}$ on E, also dependency of N_μ on N_e and its comparison with the simulation work consistently show an increase of mass composition of cosmic ray above its primary energy 4×10^{19} eV.

Also because of the increased mass composition of CR (higher charge) it means more deflection of CR in the Galactic magnetic field. Therefore the particles of higher energies (above 4×10^{19} eV) are more confined to the galaxy than the lower energies so their sources may be of galactic than extragalactic origin.

The results of this search also give a light on the CR Astrophysical origin models named top-down models (10-50 percent of gamma primaries) and bottom-up models (less than 1 percent photons). (The low percent of Gamma primaries is not in the favor of top-down models scenario of no acceleration).

Keywords: Cosmic ray, Extensive Air Shower, Muon component, Electron component

۱ مقدمه

آشکارسازهای سوسوزنی عملی می‌شود که نمونه‌ای از آنها آرایه‌های یا کوتسک در ژاپن است که بهمن‌هایی با انرژی بیشتر از 10^{19} eV را ثبت کرده‌اند. آرایه آشکارسازهای یا کوتسک در سطح ۱۸ کیلومتر مربع نزدیک یا کوتسک (عرض ۶۲ درجه شمالی و طول ۱۲۹ درجه غربی) در ۱۰۵ متری از سطح دریا که دارای عمق 1020 gcm^{-2} است قرار گرفته است. در فهرست‌نامه

برخورد پرتوهای کیهانی اولیه با انرژی‌های بیش از 10^{13} eV و مولکول‌های جو باعث تولید بهمن‌های گسترده‌ی هوایی می‌شود، که مشتمل بر سه مؤلفه الکترونی، میونی و هادرونی هستند. هرکدام از این مؤلفه‌ها می‌تواند اطلاعات مهمی را در مورد خصوصیات بهمن‌ها، ترکیبات جرمی، انرژی و جهت ورود آنها فراهم کند. یک روش آشکارسازی این بهمن‌ها، با آرایه‌های زمینی

برای محاسبه N_{μ} نیز از فرمول NKG مربوطه آن استفاده شده است؛ که این فرمول طبق رابطه (۵) تا فاصله‌های بیشتر از ۲۰۰۰ متر از مرکز هر بهمن معتبر است.

$$\rho_{\mu}(R) = \frac{N_{\mu}}{R_0^2} f_{NKG} \quad (۴)$$

$$f_{NKG} \left(\frac{R}{R_0} \right) = (C_{\mu}) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{-\alpha} \left(1 + \frac{R}{R_0} \right)^{-\beta} \left(1 + \left(\frac{R}{800} \right)^3 \right)^{-\delta} \quad (۵)$$

مقادیر $\alpha=0.75$ ، $\beta=2.52$ و $\delta \sim 0.6$ است. (هایاشیدا و همکاران، ۱۹۵۵)

با محاسبه N_{μ} و N_e از فرمول‌های مربوط نسبت آنها برحسب انرژی قابل محاسبه است.

دانشمندان این حوزه انتظار دارند که بهمن‌هایی با ذره اولیه کیهانی، تعداد میون‌های بیشتری نسبت به تعداد میون‌های بهمن‌ها با منشأ اولیه گاما داشته باشند. اما طبق اثر LPM در انرژی‌های زیاد افزایش تعداد میون‌ها به تعداد الکترون‌ها را در بهمن‌هایی با منشأ اولیه گاما داریم، علاوه بر عامل انرژی، زاویه سمت الرأس (θ) نیز در افزایش تعداد میون‌ها موثر است، پرتوهای گاما با انرژی زیاد که در زوایای سمت‌الرأس نزدیک افق وارد جو می‌شوند، طول مسیر جوئی بیشتری (حدود ۸ برابر) نسبت به بهمن‌های عمودی در جو طی می‌کنند. بنابراین احتمال برهم‌کنش آنها برای گسترش بهمن‌های هوایی بیشتر است و این چنین بهمن‌هایی غنی از میون خواهند بود (صمیمی و همکاران، ۱۹۹۹)، بنابراین $\frac{N_{\mu}}{N_e}$ برای بهمن‌های عمودی (زاویه سمت‌الرأس کمتر از ۱۰ درجه) و بهمن‌های مایل (زاویه سمت‌الرأس بیشتر از ۵۰ درجه) محاسبه شده است.

اما نتیجه‌ای که می‌توان از شکل ۱ گرفت این است که در انرژی‌های کمتر از $4 \times 10^{19} \text{eV}$ نسبت $\frac{N_{\mu}}{N_e}$ برحسب انرژی تقریباً به صورت خطی است اما در انرژی‌های بیشتر از $4 \times 10^{19} \text{eV}$ افزایش این نسبت کاملاً مشهود است، بنابراین منشأ این چنین پرتوهای کیهانی، پرتو گاما (طبق اثر

داده‌ها مقدار ρ چگالی ذرات باردار، ρ_{μ} چگالی میون‌ها، R فاصله از محور بهمن، R_0 شعاع مولیر و E انرژی ذره اولیه و جهت ورود هر بهمن به زمین (زاویه سمت الرأس θ) موجود است، داده‌های بهمن‌های هوایی موجود در فهرست‌نامه از ۱۹۷۱-۱۹۸۶ ثبت شده‌اند. (مرکز داده‌های جهانی برای پرتوهای کیهانی، ۱۹۸۸)

۲ روش و محاسبه

۱-۲ وابستگی $\frac{N_{\mu}}{N_e}$ برحسب انرژی

اولین روشی که در بررسی ترکیبات جرمی پرتوهای کیهانی از آن استفاده شد، بررسی وابستگی $\frac{N_{\mu}}{N_e}$ است (یعنی نسبت تعداد کل میون‌ها به تعداد کل الکترون‌های هر بهمن برحسب انرژی پرتو کیهانی اولیه). انتظار می‌رود که این نسبت برای ذرات گاما، پروتون و هسته‌های سنگین به ترتیب افزایش پیدا کند که این مطلب نیز در نتایج شبیه‌سازی کپدویل و همکاران، (۲۰۰۰) نشان داده شده است.

ابتدا برای محاسبه N_e از فرمول مناسب NKG که بر پایه نظریه آبخار الکترومغناطیسی بنا شده است استفاده می‌شود.

$$\rho_e(R) = \frac{N_e}{R_0^2} f_{NKG} \quad (۱)$$

$$f_{NKG} \left(\frac{R}{R_0} \right) = C(s) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{R}{R_0} \right)^{s-4/5} \quad (۲)$$

که در رابطه (۲)، S پارامتر عمر بهمن که مرحله پیشرفت بهمن در جو را بیان می‌کند و $C(s)$ ضریب نرمال‌سازی است.

$$C(s) = \frac{\Gamma(4/5-s)}{2\pi\Gamma(s)\Gamma(4/5-2s)} \quad (۳)$$

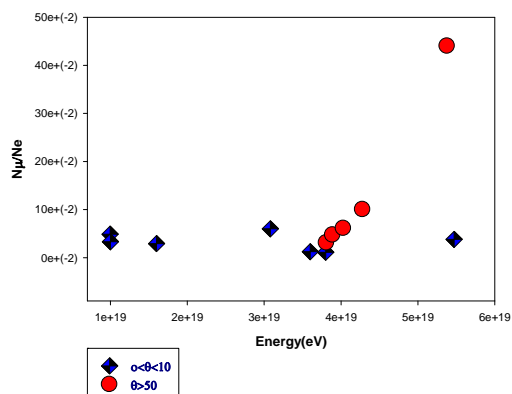
مقادیر ρ و R داده شده در فهرست‌نامه داده‌ها را روی رابطه (۱) برازش، و مقدار N_e با کمترین ضریب خطا محاسبه شد.

آهن) هستند.

۳-۲ مقایسه همبستگی $N_{\mu} - N_e$ داده‌های تجربی

با نتایج شبیه‌سازی

تجزیه و تحلیل مستقل دیگری که برای تأکید این نتیجه افزایش ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی در انرژی‌های خیلی زیاد- صورت گرفت، بررسی همبستگی $N_{\mu} - N_e$ داده‌های تجربی است که در شکل ۳ برای گستره‌ی انرژی بیشتر و کمتر از $4 \times 10^{19} \text{eV}$ نشان داده شده است. به منظور مقایسه، در همین شکل نتایج شبیه‌سازی شده این همبستگی برای ترکیبات جرمی گاما، پروتون و آهن با نرم‌افزار کورسیکا نیز آورده شده است (کپدویل و همکاران، ۲۰۰۰). در این شکل سه نوع بازه برای همبستگی $N_{\mu} - N_e$ برای بهمن‌ها با ذره اولیه کیهانی، آهن و پروتون و بهمن‌هایی با منشأ اولیه گاما مشخص شده است. $N_{\mu} - N_e$ داده‌های تجربی یا کوسک در انرژی‌های بیشتر و کمتر از $4 \times 10^{19} \text{eV}$ برای مقایسه، روی این نمودار قرار گرفته‌اند. از مقایسه نتایج حاصل از داده‌های تجربی و نتایج شبیه‌سازی برای انرژی کمتر از $4 \times 10^{19} \text{eV}$ ترکیبات جرمی مخلوط پروتون و آهن و برای انرژی بیشتر از این انرژی، ترکیب جرمی آهن پیشنهاد می‌شود.



شکل ۱. نمودار نسبت تعداد میون‌ها به تعداد الکترون‌ها برای زوایای بیشتر از ۵۰ و کمتر از ۱۰ درجه.

(LPM) یا هسته‌های سنگینی هستند که پرتوهایی با تعداد غنی میون تولید کرده‌اند ولی با توجه به افزایش بسیار زیاد $\frac{N_{\mu}}{N_e}$ با انرژی، وجود هسته‌های سنگین نسبت به پرتوهای گاما (در پرتوهای کیهانی اولیه) محتمل‌تر می‌نماید. این موضوع در تحلیل‌های مستقل ترکیبات جرمی در ادامه بررسی خواهد شد.

۲-۲ پارامتر عمر

پارامتر مهم دیگری از بهمن‌ها که در تعیین ترکیبات جرمی و نیز تعداد کل الکترون‌ها استفاده می‌شود، پارامتر عمر است که مقادیر آن از ۰٫۱ تا ۲ تغییر می‌کند و برای هر بهمن با توجه به معادله NKG محاسبه می‌شود. مقدار ρ و R داده شده در فهرست‌نامه داده‌ها را روی رابطه (۱) برازش کرده و پارامتر عمر با کمترین ضریب خطا محاسبه شده است، با رسم نمودار میانگین پارامتر عمر بهمن‌ها برحسب انرژی افزایش این پارامتر برای انرژی‌های بیشتر از $4 \times 10^{19} \text{eV}$ مشهود است. (شکل ۲). وابستگی پارامتر عمر یک بهمن به ترکیبات جرمی آن از اینجا ناشی می‌شود که بهمن‌هایی با جرم بیشتر از ذره اولیه توزیع جانبی الکترونی آنها برحسب فاصله از مرکز بهمن دارای شیب کمتری است و دلیل این اتفاق آن است که بهمنی با جرم بیشتر، مثل آهن، به علت تعداد زیاد نوکلئون‌هایی است که دارد. هر کدام از این نوکلئون‌ها به طور جداگانه بهمن‌های کوچک‌تری را تشکیل می‌دهند که این بهمن‌ها روی یکدیگر برهم‌نهی می‌کنند، پس سطح مشترک بیشتری را در برمی‌گیرد و شیب کمتری خواهد داشت. با این حال برای یک بهمن با ذره اولیه سبک تک‌نوکلئونی، مثل پروتون، دیگر برهم‌نهی در کار نیست و شیب توزیع جانبی الکترونی برحسب فاصله به صورت معمولی و بیشتر است؛ بنابراین پارامتر عمر کمتری دارد. در این صورت می‌توان نتیجه گرفت که بهمن‌هایی با انرژی بیشتر از $4 \times 10^{19} \text{eV}$ دارای ترکیبات جرمی سنگین‌تری (مثل

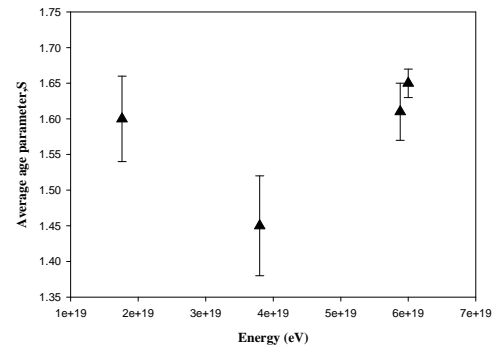
هسته‌های سنگین همچون آهن که بار خیلی بیشتری نسبت به پروتون دارد، شعاع چرخش بسیار کوچک‌تری نسبت به پروتون پیدا می‌کند؛ بنابراین، محدود به کهکشان می‌شود و منشأ کهکشانی خواهد داشت.

در ضمن نتایج این پژوهش در تأیید مدل اختفیزیکی - منشأ تولید پرتوهای کیهانی با انرژی‌های بسیار زیاد- *top-down* و *bottom-up* (پژوشپانی و همکاران، ۲۰۰۰) نیز دارای اهمیت است.

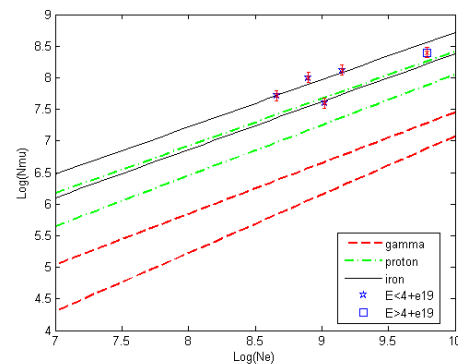
نتیجه این تحقیق آن است که در صورت صحت، بیش از ۵۰ درصد گاماها در پرتوهای کیهانی مدل *top-down* و کمتر از ۱ درصد بر مدل اختفیزیکی *bottom-up* تأکید دارد. تطابق نداشتن ترکیبات جرمی این پژوهش با پرتوهای گاما، به حمایت مدل *bottom-up* اشاره دارد.

مراجع

- Capdevielle, J. N., Le Call C. and Sanosyan N., 2000, Simulation of extensive air showers at ultrahigh energy using the CORSIKA Monte Carlo code, *Astro-Ph.*, **13**, 259-275.
- Hayashida, N., Honda, K., Honda, M., Imaizumi, S., Inoue, N., Kodota, k., Kakimoto, F., Kamata, K., Kawasumi, N., Matsubara, Y., Murakami, K., Nagano, M., Ohoka, H., Takada, M., Teshima, M., Tushima, I. and Yoshida, S., 1995, Muons ($> 1\text{GeV}$) in large extensive air showers of energies between $10^{16.5}\text{ eV}$ and $10^{19.5}\text{ eV}$ observed at Akeno, *Nucl.Part.Phys.*, **21**, 1101-1119.
- Mikhailov, A. A., Efemov, N. N., Gerasimova, N. S., Makarov, I. T., Nikolayeva, G. N. and Struchkov, G. G., 2005, Estimate of mass composition of Ultrahigh energy cosmic rays, *ICRC.*, **29**, 101-104.
- Pijushpani, B. and Gunter, S. 2000, Origin and propagation of extremely high- energy cosmic rays, *Physics Reports*, **327**, 109-247.
- Samimi, J., Bahmanabadi, M., Bhattacharya, D., Dixon, D., Rastegarzadeh, G., 1999, LPM Effect on Muon Content of Air Showers, *ICRC.*, **26**, 116-119.
- World data center C2 for cosmic rays, 1988, Catalogue of highest energy cosmic rays, No **3**, 23-53.



شکل ۲. نمودار میانگین پارامتر عمر بهمین‌ها برحسب انرژی ذره اولیه.



شکل ۳. مقایسه نمودار $N_{\mu} - N_e$ شبیه‌سازی کورسیکا (کپدویل و همکاران، ۲۰۰۰) با نتایج حاصل از داده‌های یاکوتسک.

۳ نتیجه‌گیری

با بررسی ترکیبات جرمی بهمین‌های هوایی با انرژی بیشتر از 10^{19} eV با توجه به پارامتر عمر مؤلفه الکترونی و نسبت $\frac{N_{\mu}}{N_e}$ و بررسی اثر LPM و مقایسه نتایج با نمودارهای شبیه‌سازی شده کورسیکا به‌طور کلی افزایش ترکیبات جرمی بهمین‌ها را در گستره انرژی بیش از $4 \times 10^{19}\text{ eV}$ نشان می‌دهد که با نتایج میخایلو و همکاران (۲۰۰۵) همخوانی دارد.

این نتایج یعنی افزایش جرم ذرات اولیه کیهانی با انرژی، دلالت بر نوع منشأ تولید این ذرات دارد. به عبارتی با افزایش انرژی این ذرات، شعاع چرخش در میدان مغناطیسی ضعیف (چند میکروگوس) افزایش می‌یابد. این شعاع چون با بار ذره نسبت عکس دارد و به‌ویژه برای