

بررسی گسترش طولی ذرات ثانویه تولید شده در جو در بهمن‌های گسترده هوایی ناشی از پرتوهای کیهانی پرنرژی

سعید دوست‌محمدی، سید جلیل‌الدین فاطمی*، حمیده محمودی‌میمند

دانشکده فیزیک دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

چکیده

پرتوهای کیهانی با انرژی‌های بالا (بیش از 10^{14} الکترون‌ولت) در برخورد با جو کره زمین، آبخاری از ذرات ثانویه را به‌راه می‌اندازند که بر حسب نفوذ این ذرات در جو به تعداد آن‌ها افزوده می‌گردد تا اینکه به یک مقدار بیشینه برسند. پس از آن از تعداد ذرات کاسته شده تا اینکه به سطح آشکارسازهای زمینی برسند. در این مقاله با استفاده از داده‌های آرایه‌های آشکارساز یاکوتسک، ولکانو رنج و هاورا پارک که در ارتفاع‌های متفاوت از سطح زمین قرار دارند، میزان تغییر تولید ذرات ثانویه مورد بحث قرار گرفته است.

کلیدواژگان: پرتوهای کیهانی پرنرژی، بهمن‌های گسترده هوایی، گسترش طولی بهمن

مقدمه

خنثی به‌وجود می‌آیند (ممکن است کائون‌ها و باریون‌ها نیز تولید شوند) که هر کدام به‌دلیل ناپایدار بودن، واپاشی کرده و دیگر ذرات را به‌وجود می‌آورند. پایون‌های خنثی به فوتون‌های گاما واپاشیده و مؤلفه آبخار الکترومغناطیسی شامل فوتون‌ها، الکترون‌ها و پازیترون‌ها را به‌راه می‌اندازند. پایون‌های باردار نیز به میون‌ها و نوترینوها واپاشی می‌کنند. به این ذرات تولید شده، ثانویه گفته می‌شود. هم‌زمان با گسترش طولی بهمن در جو، به تعداد ذرات ثانویه اضافه گشته تا اینکه در یک ارتفاع ویژه از سطح زمین به بیشترین میزان خود می‌رسند. به این سطح، بیشینه عمق بهمن^۳ گفته می‌شود که در آن پارامتر عمر بهمن برابر با یک در نظر گرفته می‌شود. (همان‌گونه که گفته شد، پارامتر عمر بهمن پیش از رسیدن به عمق بیشینه،

از مهمترین پارامترهای مربوط به بهمن‌های گسترده هوایی، اندازه بهمن^۱ (تعداد کل الکترون‌های رسیده به سطح مشاهده) و همچنین پارامتر عمر بهمن^۲ می‌باشند. (منظور از پارامتر عمر بهمن این است که به‌طور قراردادی عمر بهمن را پیش از رسیدن آن به عمق بیشینه، کمتر از یک، در عمق بیشینه، یک و پس از گذر از عمق بیشینه، بیشتر از یک در نظر می‌گیرند) هنگامی که یک ذره کیهانی اولیه با انرژی بالا (پروتون، یک هسته اتمی، یک الکترون، یک فوتون و یا به ندرت یک پازیترون) به مولکول‌های جو زمین برخورد می‌کند، در برخوردهای هسته‌ای، ابتدا هادرون‌ها از جمله پایون‌های مثبت، منفی و

*نویسنده مسئول: jalili_fatemi@yahoo.com

^۱ Ne

^۲ s

^۱ Xmax

گسترش بهمن‌های گسترده هوایی ناشی از ذرات بسیار پر انرژی تأثیر می‌گذارند. در کار حاضر، به دلیل استفاده از داده‌های آشکارسازهای متفاوت، این تأثیرات در پارامتری، تحت عنوان شعاع مولیر در نظر گرفته شده است. همچنین، با بررسی گسترش طولی بهمن‌های گسترده هوایی و به دست آوردن اندازه بهمن، می‌توان به بررسی ترکیبات جرمی ذرات اولیه پرداخت. در مقاله پیشین ما [۵] نشان داده شده که در انرژی 4×10^{19} الکترون ولت، شکستگی در نمودار اندازه بهمن برحسب انرژی اولیه دیده می‌شود که ناشی از تغییر ترکیبات جرمی ذره کیهانی اولیه است. از طرف دیگر زاویه‌های فرودی (زاویه‌ای که جهت جبهه موج ذرات به سمت زمین با خط عمود بر سطح زمین می‌سازد) ذرات پرنرژی، که بهمن‌های گسترده هوایی را به راه انداخته و بیشتر مربوط به منابع تولید این ذرات می‌باشند، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کنند. همچنین، موارد گفته شده به چگونگی در نظر گرفتن محیط پخش ذرات کیهانی اولیه نیز بستگی دارد [۶].

چندی پیش نیز ماکسیمو اوه و همکارانش [۷] نشان دادند که یکی از پارامترهای مهم بررسی کل سیگنال دریافتی از یک بهمن در سطح زمین می‌تواند به سطحی که در آن بیشینه بهمن روی می‌دهد بستگی داشته باشد، که یکی از مهمترین موارد مربوط به بررسی گسترش طولی بهمن‌های گسترده هوایی یافتن این سطح است.

روش

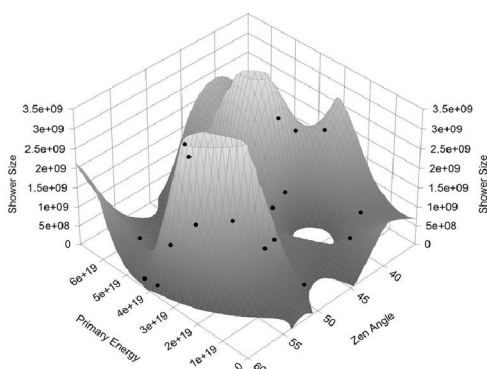
در این مقاله، از داده‌های آرایه‌های آشکارساز یاکوتسک [۸] به عنوان داده‌های مرجع استفاده شده است. چرا که این داده‌ها، علاوه بر داشتن انرژی ذره اولیه و جهت فرودی آن، شامل حدود چهل بهمن با انرژی بیش از 10^{18} الکترون ولت بوده که دارای

کمتر و پس از آن بیشتر از یک می‌باشد. بنابراین، چنین امکانی نیز وجود دارد که یک بهمن گسترده هوایی پیش از آنکه به بیشینه خود برسد به سطح آشکارسازها برخورد کند که این حالت به نوع و انرژی ذره اولیه بستگی دارد. بیشترین تعداد ذرات ثانویه را الکترون‌ها تشکیل می‌دهند که به تعداد آنها در سطح مشاهده، اندازه بهمن گفته می‌شود. هنگامی که الکترون‌ها پس از بر همکنش‌های متفاوت جوی به سطح آشکارسازها می‌رسند، در فاصله‌های متفاوت چگالی‌های متفاوتی خواهند داشت. گریسن و همکاران [۱] در سال ۱۹۶۰ تابعی^۱ را ارائه دادند که به گونه مناسبی ارتباط بین چگالی‌های الکترونی، اندازه بهمن، پارامتر عمر و فاصله از مرکز بهمن (محل برخورد مؤلفه هادرونی بهمن به سطح مشاهده) را بیان می‌کند که با استفاده از آن می‌توان اندازه بهمن یک بهمن و پارامتر عمر آن (که بیانگر مرحله گسترش طولی بهمن است) را اندازه‌گیری نمود.

گایزر و هیلاس [۲] در سال ۱۹۷۷ تابعی را ارائه کردند که با استفاده از ارتباط بین تعداد ذرات در ارتفاع‌های متفاوت، میزان بیشینه عمق بهمن اندازه‌گیری می‌شود که پارامتر بسیار مهمی در تعیین ترکیبات جرمی پرتوهای کیهانی اولیه به شمار می‌رود. همچنین کیس [۳] در سال ۱۹۸۴، با استفاده از روش‌های شبیه‌سازی مونته کارلو، با بررسی گسترش طولی مؤلفه الکترومغناطیسی بهمن‌ها، نشان داد که توزیع عرضی الکترون‌های موجود در بهمن‌های با پارامتر عمر یکسان، هم به سطحی که در آن بهمن به راه می‌افتد بستگی دارد و هم به انرژی ذره اولیه. رصدخانه پرتوهای کیهانی اوژه [۴] نشان داد که پارامترهای جوی همچون فشار، دما و چگالی بر

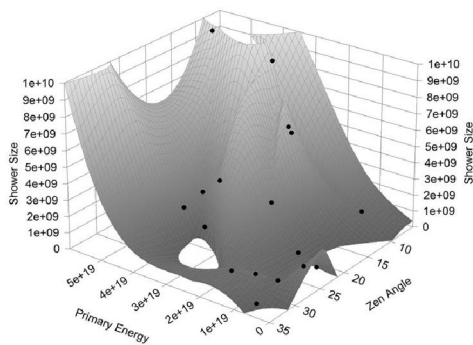
^۱ Nishimura-Kamata-Greisen (NKG) function

Ep-Zen-Ne (Zen>35)



شکل الف. نمودار اندازه بهمن بر حسب انرژی اولیه و زاویه فرودی برای زاویه‌های بالای ۳۵ درجه.

Ep-Zen-Ne (Zen<35)



شکل ب. نمودار اندازه بهمن بر حسب انرژی اولیه و زاویه فرودی برای زاویه‌های زیر ۳۵ درجه.

با داشتن اندازه بهمن بهمن‌های متفاوت مربوط به سه آرایه آشکارساز، نمودارهای این پارامتر بر حسب انرژی اولیه رسم گردیدند. همان‌گونه که در ابتدای مقاله گفته شد، ارتفاع آشکارسازها از سطح دریا یکسان نمی‌باشد. آرایه‌های یاکوتسک و هاورا پارک تقریباً در یک سطح بوده و حدود سطح دریا می‌باشند. ولی آرایه‌های ولکانو رنج در ارتفاع ۱۷۰۰ متری از سطح دریا قرار گرفته است. از طرفی چنانچه انتظار می‌رود بایستی با افزایش انرژی ذره اولیه، اندازه بهمن نیز زیادتر شود. چرا که هم فرآیند تولید ذرات ثانویه

چگالی الکترون‌ها بر حسب فاصله از مرکز بهمن می‌باشند. ابتدا نمودار چگالی الکترونی بر حسب فاصله از مرکز بهمن برای تمامی بهمن‌ها رسم شد. سپس تابع گریسن (فرمول ۱) بر نمودار به‌دست آمده برازش گردید. پس از این کار دو پارامتر مهم و کلیدی برای هر بهمن یکی پارامتر عمر و دیگری اندازه بهمن به‌دست می‌آید.

$$\rho_e(N_e, r) = \frac{N_e}{2\pi r_0^2} \frac{\Gamma(4.5-s)}{\Gamma(s)\Gamma(4.5-2s)} \times$$

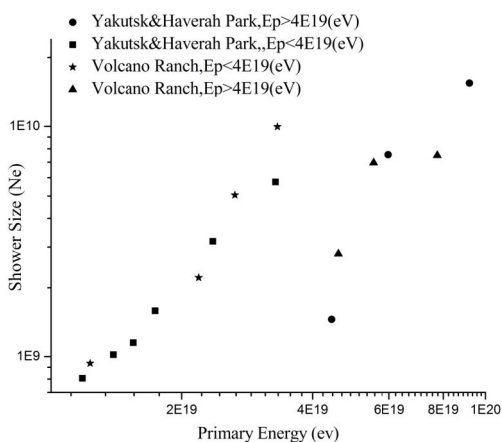
$$\left(\frac{r}{r_0}\right)^{(s-2)} \times \left(1 + \frac{r}{r_0}\right)^{(s-4.5)}$$

۱

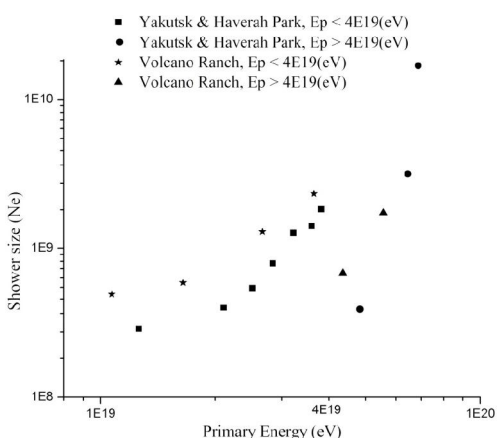
در این فرمول، ρ_e چگالی الکترونی در فاصله r از مرکز بهمن، N_s اندازه بهمن، s پارامتر عمر بهمن و r_0 شعاع مولیر می‌باشد.

اما داده‌های دو آرایه آشکار ساز دیگر، یعنی هاورا پارک و ولکانو رنج، دارای مشخصات آرایه آشکار ساز یاکوتسک نمی‌باشند. این داده‌ها فقط شامل انرژی ذره اولیه و جهت فرودی آن بودند. بنابراین، برای یافتن پارامتر عمر و اندازه بهمن برای آن داده‌ها، ابتدا از زاویه‌های فرودی بهمن‌ها میانگین‌گیری به‌عمل آمد تا مشخص گردید که بهمن‌ها در دو طرف زاویه میانگین ۳۵ درجه از خود ویژگی‌های متفاوتی بروز می‌دهند. بدین ترتیب، در زاویه‌های کمتر و بیشتر از ۳۵ درجه، نمودار سه بعدی مربوط به ۳ پارامتر انرژی ذره اولیه، زاویه فرودی ذره و اندازه بهمن رسم گردید (شکل الف و ب). با رسم یک برازش سه بعدی مناسب و داشتن زاویه و انرژی اولیه در دو آشکارساز هاورا پارک و ولکانو رنج و سرانجام استفاده از یک برون‌یابی مناسب، اندازه بهمن مربوط به این دو آرایه آشکار ساز نیز به‌دست آمد.

می‌دهد. نکته قابل توجه دیگری که در نمودارها به چشم می‌خورد، به همین دلیل است که در انرژی‌های بالای 4×10^{19} الکترون ولت، در هر دو حالت، زاویه‌های کمتر و بیشتر از ۳۵ درجه، تفاوت گفته شده دیده نمی‌شود. این حالت را می‌توان به تغییر ترکیبات جرمی ذرات اولیه و در نتیجه به تغییرات در ذرات ثانویه و همچنین انرژی فوق‌العاده زیاد ذره اولیه نسبت داد که جای کار و بررسی بیشتری دارد.



شکل ۲الف. تغییرات اندازه بهمن بر حسب انرژی برای آرایه‌های متفاوت و زاویه‌های فرودی کمتر از ۳۵ درجه.



شکل ۲ب. تغییرات اندازه بهمن بر حسب انرژی برای آرایه‌های متفاوت و زاویه‌های فرودی بیشتر از ۳۵ درجه.

با افزایش انرژی افزایش پیدا می‌کند و هم اینکه با رفتن به سمت ترکیبات جرمی سنگین‌تر، با توجه به بالاتر رفتن تعداد پروتون‌های موجود در هسته‌ها، این افزایش اندازه بهمن امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. بنابراین همان‌گونه که از شکل ۲الف هم پیداست، در زاویه‌های کمتر از ۳۵ درجه در انرژی‌های کمتر از 4×10^{19} الکترون ولت، با افزایش انرژی، میزان اندازه بهمن نیز افزایش پیدا کرده است. اما نکته قابل توجه در این نمودار اینست که با وجود اینکه آرایه‌های ولکانو رنچ نسبت به یاکوتسک و هاوراپارک در ارتفاع بالاتری از سطح زمین قرار گرفته‌اند، اما تغییری در میزان افزایش اندازه بهمن بین این آرایه‌ها به چشم نمی‌خورد. اما، این در حالست که با توجه به شکل ۲ب که مربوط به زاویه‌های بیشتر از ۳۵ درجه می‌باشد، در همان گستره انرژی یعنی کمتر از 4×10^{19} الکترون ولت، تفاوت چشمگیری در روند افزایش اندازه بهمن بین آرایه آشکارساز ولکانو رنچ که در ارتفاع بالاتری از سطح دریا قرار گرفته نسبت به دو آرایه آشکارساز دیگر یعنی یاکوتسک و هاوراپارک که تقریباً در سطح دریا واقعند، به چشم می‌خورد. بدین ترتیب طبق شکل ۲ب الکترون‌های تولید شده در ارتفاع بالاتر بسیار بیشتر از سطح‌های پایین‌تر هستند. این مطلب تأییدی است بر اینکه در بهمن‌های گسترده هوایی پس از رسیدن به بیشینه تولید ذرات، دوباره از تعداد ذرات کاسته شده تا به سطح آشکارسازها برسند.

نکته مهم دیگر، اهمیت زاویه فرودی ذرات است. چرا که در شکل ۲الف کم‌بودن زاویه‌های فرودی باعث کاسته شدن از عمق مایل^۱ حرکت ذرات در جو گردیده و در نتیجه کاهش کمتری در تعداد ذرات رخ

^۱ Slant depth

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به دست آمده از محاسبات و نمودارها، مشخص گردید که در گسترش طولی بهمن‌های گسترده هوایی، اندازه بهمن در سطح‌های متفاوت با یکدیگر فرق دارد. این تفاوت به طور ویژه در زاویه‌های فرودی بالای ۳۵ درجه و در انرژی‌های کمتر از 4×10^{19} الکترون‌ولت، در آرایه‌های مستقر در دو ارتفاع متفاوت از سطح زمین به وضوح مشاهده گردید. در زاویه‌های بالا، عمق مایلی را که ذرات موجود در بهمن‌ها طی می‌کنند افزایش پیدا کرده که این عامل باعث می‌گردد تا فرصت زیادتری برای تولید بیشتر ذرات ثانویه فراهم آید. اما این تفاوت در زاویه‌های فرودی کمتر از زاویه میانگین ۳۵ درجه نمود چندانی نداشت. چرا که اختلاف ارتفاع دو سطح مشاهده در زاویه‌های کم و در نتیجه طول عمق مایل سپری شده بین دو سطح، کاهش پیدا کرده که این کاهش اجازه تولید ذرات ثانویه بیشتر را نمی‌دهد. در انرژی‌های بالای 4×10^{19} الکترون‌ولت، به دلیل میزان بالای انرژی و همچنین تغییر ترکیبات جرمی به سمت هسته‌های سنگین و فرآیندهای مربوط به تولید ذرات ثانویه، این اثر دیده نشد.

سپاسگزاری

در اینجا لازم است که از پروفیسور راجر کلی استاد دانشگاه آدلاید استرالیا که داده‌های ارزشمند این

مقاله را که در فرصت مطالعاتی پروفیسور فاطمی در اختیار گذاشتند صمیمانه سپاسگزاری شود.

مراجع

- [1] K. Greisen, Cosmic ray showers, *Annual Review of Nuclear Science* 10 (1960) 63-108.
- [2] T.K. Gaisser, A.M. Hillas, Reliability of the method of constant intensity cuts for reconstructing the average development of vertical showers, *International Cosmic Ray Conference* 8 (1977) 353-357.
- [3] E. Kays, Longitudinal and lateral structure of electromagnetic cascade simulated by full monte-carlo method, *Acta Physics Polonica* B16 (1985) 109-123.
- [4] J. Abraham, P. Abreu, M. Aglietta, Atmospheric effects on extensive air showers observed with the surface detector of the Pierre Auger observatory, *Astroparticle Physics* 32 (2009) 89 – 99.
- [5] 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.
- [6] S. Doostmohammadi, S.J. Fatemi, The characteristics of cosmic rays in a fractal medium, *ISRN high energy physics journal* (2012).
- [7] A. Maximo, R. Engel, J. Gonzalez, D. Heck, T. Pierog, M. Roth, Extensive air shower universality of ground particle distributions, *32nd International Cosmic Ray Conference, Beijing* (2011).
- [8] N.N. Efimov, T.A. Egorov, D. Krasilnikov, M.I.D. Pravdin, I. Sleptsov, *World Data Center of Yakutsk arrays* (1988).