مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۰، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۸۹

وجود قله در توزیع عرضي فوتون‌هاي چرنکوف بهمن گاماي اولیه و تأثیر عوامل مؤثر برآن

گوهر رستگارزاده و محبوبه نجمي

دانشکدهٔ فیزیك، دانشگاه سمنان

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۴/۲۳ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۸۸/۱۲/۲۴)

چکیده

ذرات ثانویهٔ پرانرژي بهمن‌هاي گسترده هوایي ناشي از پرتوهاي کیهاني گاما و پروتون در سطح مشاهده تولید فوتون‌هاي چرنکوف مي‌کنند. در کار حاضر با استفاده از کد CORSIKA و شبیه‌سازي پرتوهاي کیهاني گاما و پروتون، مشخصه‌ها وتفاوت‌هاي توزیع‌هاي عرضي فوتون‌هاي چرنکوف آنها بررسي شده است. به‌خصوص به منشأ فیزیکي این تفاوت‌ها و رابطهٔ این توزیع‌ها با انرژي پرتو اولیه و نیز ارتفاع رصدخانه مورد مشاهده پرداخته‌ایم. ما نشان داده‌ایم وجود یك قله در توزیع عرضي فوتون‌هاي چرنکوف پرتوهاي گاما مي‌تواند ابزار مناسبي جهت حذف زمینه مزاحم هادروني در نجوم گاما باشد.

واژه‌هاي کلیدي: CORSIKA، فوتون چرنکوف، نجوم گاما و پرتوهاي کیهاني

۱. مقدمه

تابش کیهانی شامل پرتوگاما و هادرون‌ها می‌باشد. شار این پرتوها با افزایش انرژی اولیه، کم می‌شود. در نتیجه آشکارسازی پرتوهای کیهانی پرانرژی به طور مستقیم وبا استفاده از بالن و ماهواره قابل انجام نیست و باید با استفاده از آشکارسازهایی در سطح زمین و ثبت ذرات ثانویه یا فوتون‌های چرنکوف بهمن‌های گستردهٔ هوایی ناشی از اندرکنش پرتوهای کیهانی با جو آشکارسازی شوند. در این میان بهمن‌های ناشی از پرتوهای کیهانی هادرونی به عنوان زمینه‌ای در آشکارسازی پرتوهای گاما محسوب می‌شوند. در نتیجه انجام نجوم گاما و یافتن چشمه‌های گاما مستلزم حذف زمینهٔ هادرونی از سیگنال گاما می‌باشد.

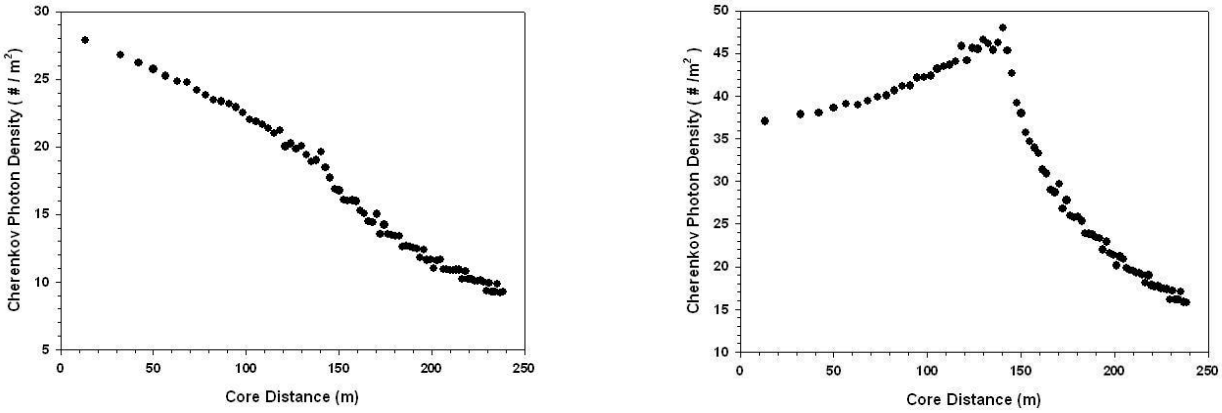
یکی از تکنیک‌های آشکارسازی پرتوهای کیهانی تکنیک چرنکوف می‌باشد. در این تکنیک با استفاده از نور چرنکوف حاصل از ذرات ثانویه پرانرژی مشخصات پرتو کیهانی اولیه از جمله نوع، انرژی و جهت به‌دست می‌آید. این تکنیک به‌خصوص در انرژی‌های پایین (حدود TeV وGeV) که تعداد ذرات ثانویه رسیده به زمین بسیار کم است، بسیار مفید می‌باشد. زیرا نور چرنکوف حاصل از این ذرات ثانویه به زمین رسیده و توسط تلسکوپ‌های چرنکوف به راحتی آشکارسازی می‌شوند[۱].

یکی از پارامترهایی که می‌توان توسط این تلسکوپ‌ها اندازه‌گیری کرد، توزیع عرضی نور چرنکوف رسیده به سطح مشاهده می‌باشد. بررسی توزیع‌های عرضی نور چرنکوف حاصل از بهمن‌های هادرونی و الکترومغناطیسی وجود یک قله با برآمدگی (hump) در توزیع عرضی نور چرنکوف حاصل از بهمن‌های اولیه گاما را نشان می‌دهد که در توزیع عرضی نور چرنکوف ناشی از اولیه‌های هادرونی وجود ندارد.

در مقالهٔ حاضر با شبیه‌سازی ۱۶۰۰۰ پرتو گاما به بررسی علت وجود این قله و مشخصه‌های آن و به‌خصوص ارتباط آن با انرژی گامای اولیه ونیز ارتفاع رصدخانه پرداخته‌ایم.

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۱.توزیع عرضی فوتون چرنکوف بهمن گامای اولیه (سمت راست) و پروتون اولیه (سمت چپ) با انرژی ۵۰۰GeV در ارتفاع ۱۰۷۵ متری از سطح دریا.

۲. شبیه‌سازی

برای به‌دست آوردن توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف ناشی از اولیه‌های گاما شبیه‌سازی با استفاده از کد CORSIKA [۲]

نسخهٔ ۶/۷ با مدل اندرکنش هادرونی انرژی بالای QGSJET01 و مدل اندرکنش هادرونی انرژی‌های پایین GHEISHA در۶ ارتفاع مختلف رصدخانه‌های معروف دنیا یعنی CANGAROO (۱۶۰متر از سطح دریا)، TUNKA (۶۷۵ متر از سطح دریا) و PACHMARHI (۱۰۷۵ متر از سطح دریا)، ALBORZ(۱۲۰۰ متر از سطح دریا)، CAT (۱۶۵۰ متر از سطح دریا) وCHACALTAYA (۵۲۲۰ متر از سطح دریا) در ۹ انرژی دربازهٔ ۱۴۰۰GeV–۵۰ انجام شده است. برای هر رصدخانه میدان مغناطیسی مربوط به محل رصدخانه با استفاده از برنامهٔ Geomag [۳] استخراج و در برنامه وارد شده است.

برای انتخاب آرایهٔ فرضی چرنکوف یک آرایهٔ بسیار بزرگ به ابعاد $۳۰۰\times۳۰۰m^2$ در نظر گرفته شد تا تمام فوتون‌های چرنکوف رسیده به سطح زمین شمارش شود. برای هر ارتفاع و انرژی به‌خصوص، تعداد ۳۰۰ پرتو اولیه گاما شبیه‌سازی شد. به این ترتیب تعداد بیش از ۱۶۰۰۰ پرتو گاما شبیه‌سازی شده است. در شبیه‌سازی‌ها محدوده طول موج ۵۵۰nm–۳۰۰ (طیف مرئی) را برای تولید فوتون‌های چرنکوف درنظر گرفته‌ایم.

۳. توزیع طولی فوتون‌های چرنکوف

بررسی تعداد و چگونگی گسترش مولفه‌های مختلف یک بهمن گسترده هوایی به عنوان تابعی از عمق جو، توزیع طولی آن مؤلفه را به دست می‌دهد. به طور خاص مطالعهٔ توزیع طولی الکترون‌ها و فوتون‌های چرنکوف حاصل از آنها پارامتر مهمی در تحلیل بهمن‌های هوایی می‌باشد. علاوه بر این، مطالعهٔ این توزیع در عمق بیشینه (X_{max}) به دلیل نوسانات کمتر در این عمق از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد[۴].

۴. توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف

در توزیع عرضی، تعداد فوتون‌ها یا ذرات بر حسب فاصله از محور در یک عمق خاص (سطح مشاهده) بررسی می‌شود. با استفاده از این توزیع می‌توان انرژی ونوع پرتو اولیه را تخمین زد [۵ و ۶ و ۷]. علاوه براین نتایج شبیه‌سازی ونیز داده‌های تجربی نشان می‌دهند که بین توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف ناشی از بهمن‌های هادرونی والکترومغناطیسی تفاوت‌های عمده‌ای وجود دارد که به تفکیک این دو از هم منجر می‌شود.

شکل ۱، توزیع عرضی فوتون چرنکوف ناشی از بهمن گاما و پروتون اولیه، با انرژی اولیهٔ ۵۰۰GeV در ارتفاع ۱۰۷۵ متری از سطح دریا (ارتفاع رصدخانه PACHMARHI در هندوستان) را نشان می‌دهد. هر نقطه روی منحنی‌ها متوسط تعداد ۵۰۰ بهمن شبیه‌سازی شده می‌باشد.

ملاحظه می‌شود که در توزیع عرضی فوتون چرنکوف ناشی از بهمن گامای اولیه، قله‌ای پدید آمده است که در مورد توزیع عرضی فوتون چرنکوف ناشی از بهمن پروتون اولیه این قله مشاهده نمی‌شود. به اصطلاح به این قله، برآمدگی گفته

Archive of SID

www.SID.ir

می‌شود که مشخصه بهمن گاما می‌باشد و این مشخصه یکی از راه‌های تفکیک بهمن گاما از بهمن‌های هادرونی می‌باشد. اگرچه بهمن پروتون دارای چنین قله‌ای نیست، اما در زیر بهمن‌های الکترومغناطیس آن، این قله وجود دارد. در واقع وقتی جمع زیربهمن‌های الکترومغناطیسی و هادرونی آن را در نظر می‌گیریم، این قله دیگر وجود ندارد. البته زیربهمن‌های الکترومغناطیسی باید برای تولید برآمدگی دارای انرژی کافی برای تولید فوتون چرنکوف باشند [۸]. اگرچه تفاوت‌های دیگری نیز بین توزیع عرضی فوتون چرنکوف بهمن گاما و پروتون اولیه وجود دارد ولی یکی از مهم‌ترین آنها، وجود برآمدگی در بهمن گامای اولیه است. به علت تعداد زیاد الکترون و پوزیترون در بهمن گاما، چگالی فوتون‌های چرنکوف بیشتر از بهمن پروتون اولیه است و همچنین نوسانات کمتری در توزیع گامای اولیه مخصوصاً در نقطهٔ برآمدگی وجود دارد[۹]. در بخش بعدی به چگونگی پدیدار شدن برآمدگی در توزیع عرضی فوتون چرنکوف در بهمن گامای اولیه و علت فیزیکی آن خواهیم پرداخت.

۵. علت تشکیل برآمدگی و منشاء آن

الکترون‌های پرانرژی پس از آنکه در بهمن الکترومغناطیس تولید شدند و انرژی آستانه برای تولید فوتون چرنکوف را داشتند، می‌توانند فوتون چرنکوف تابش کنند. آنها، هنگام عبور از جو در حین پایین آمدن از آن، طی فرآیندهای مختلفی چون تابش ترمزی (برمشترالونگ) یا فرآیند یونیزاسیون و یا پراکندگی کولمب و...، انرژی خود را پیوسته از دست می‌دهند. در نتیجه زاویه پراکندگی آنها با کاهش E افزایش می‌یابد ($\theta_s \sim 1/E$) و همچنین زاویه چرنکوف θ_c (زاویه‌ای که در آن الکترون، فوتون چرنکوف تابش می‌کند) نیز افزایش می‌یابد. زاویهٔ پراکندگی از طریق رابطهٔ زیر به عمق t بستگی دارد[۱۰]:

$$\theta_s = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{E_s}{E_t} \left[\left(e^{2t} - 1 \right)^{\frac{1}{2}} / e^t \right], \qquad (1)$$

در رابطهٔ (۱)، $t = x/\lambda$ که x عمق الکترون بر حسب g/cm^2 و λ طول تابش در هوا ($37/2 g/cm^2$) و $E_s = 0/021 GeV$ می‌باشد. بنابراین به طور تقریبی داریم:

$$\theta_s \sim e^x \ . \qquad (2)$$

از طرف دیگر n ضریب شکست نیز به x وابسته است، طبق رابطهٔ زیر [۸] داریم:

$$n = 1 + \eta \ ,$$
$$\rightarrow \ \eta = 0/000292(6)(x/1030) \times (273/2 \ / \ (204 + 0/091x)) \ , \qquad (3)$$

و با استفاده از رابطهٔ (۳) و $\theta_c = \cos^{-1}\left(1/\beta n\right)$ و به کاربردن تقریب $\tan\theta \sim \theta$ داریم:

$$\theta_c \ \sim \sqrt{(2\eta)} \ , \qquad (4)$$

که اگر رابطهٔ (۳) را در معادلهٔ (۴) قرار دهیم می‌توانیم ارتباط زاویهٔ چرنکوف را با عمق جو بیابیم :

$$\theta_c \sim \sqrt{x} \ . \qquad (5)$$

از روابط (۲) و(۵) می‌توان این نتیجه را گرفت که با افزایش عمق جو و نفوذ در جو زاویهٔ پراکندگی سریع‌تر از زاویه چرنکوف افزایش می‌یابد. البته در یک انرژی خاص (انرژی آستانه چرنکوف) و در یک عمق خاص، زاویهٔ پراکندگی کمتر از زاویه چرنکوف می‌شود. به شرط کوچک بودن زاویهٔ پراکندگی، فوتون‌های چرنکوفی که در ارتفاع h از سطح مشاهده تولید شوند، پس از طی جو در فاصله $h\theta_c$ به سطح مشاهده می‌رسند. در هندسهٔ شکل ۲ این مسئله به خوبی نشان داده شده است.

حال به این مسئله می‌پردازیم تحت چه شرایطی زاویهٔ پراکندگی کوچک‌تر از زاویه چرنکوف می‌شود.

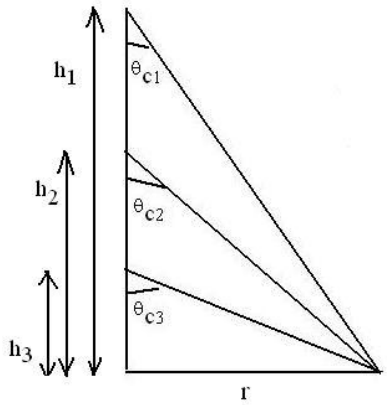
با استفاده از روابط (۱) و(۵) شرط آستانهٔ $\theta_s = \theta_c$ منجر به رابطهٔ زیر می‌شود:

$$E_t \sqrt{x} = C \ , \qquad (6)$$

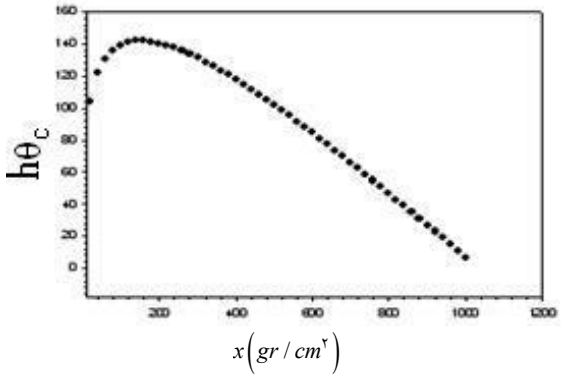
که E_t انرژی موجود در الکترون در عمق x پس از تولید از طریق فرآیند تولید زوج می‌باشد و ثابت C برابر $13/9 GeV\left(g/cm^2\right)^{1/2}$ می‌باشد. رابطهٔ فوق معرف آن الکترون‌هایی است که انرژی E_t دارند و دارای شرط $\theta_s = \theta_c$ می‌باشند. این انرژی، انرژی آستانه‌ای می‌باشد که برای مقادیر بیشتر از این مقدار، $\theta_s < \theta_c$ می‌شود. یعنی اگر انرژی الکترون‌ها بیشتر از E_t باشد، زاویه پراکندگی θ_s کاهش می‌یابد؛ چون θ_s به انرژی و عمق وابسته است ولی θ_c تقریبا فقط به عمق وابسته

Archive of SID

www.SID.ir



شکل ۲. شکل شماتیک از محل تشکیل hump.



شکل ۳. منحنی $h\theta_c$ برحسب عمق x.

است. بنابراین شرط زاویه‌ای $\theta_s \le \theta_c$ برقرار می‌شود. اگر در این انرژی آستانه تعداد الکترون‌ها زیاد باشد، برآمدگی به وجود می‌آید.

عمق x که در آن الکترون‌هایی با انرژی E_t دارای بیشترین تعداد هستند، از رابطهٔ زیر به دست می‌آید[۱۰]:

$$x = \lambda[\ln(E_\gamma / E_t) - ۰/۵], \qquad (۷)$$

که λ طول تابش در هوا $(۳۷/۲\ g/cm^۲)$ می‌باشد و E_γ انرژی گامای اولیه می‌باشد.

با جایگذاری رابطهٔ (۶) در معادلهٔ (۷) می‌توان بیشینه عمقی را یافت که در آن الکترون‌ها با انرژی E_t و شرط زاویه‌ای $\theta_s = \theta_c$، فوتون چرنکوف تولید می‌کنند که اگر تعداد الکترون‌های پرانرژی بیشتر باشد و سهم بیشتر در تولید فوتون چرنکوف داشته باشند، شرط زاویه‌ای $\theta_s \le \theta_c$ را ارضا کرده، در این انرژی و عمق خاص، برآمدگی را می‌سازند. برای مثال، برای انرژی اولیه پرتوگاما $E_\gamma = ۱۰۰GeV$، مقدار E_t برابر $۱/۱GeV$ است و عمق x مقدار $۱۵۰\ g/cm^۲$ را دارد [۱۰]. بدین معنی که الکترون‌های بهمن گامای ۱۰۰GeV که انرژی بیشتر از ۱/۱GeV دارند، در عمق $۱۵۰\ g/cm^۲$، با شرط $\theta_s \le \theta_c$، بیشینه فوتون‌هایی را تولید می‌کنند که برآمدگی را می‌سازند که همه آنها (فوتون‌ها) در فاصله ثابت $h\theta_c$ به زمین می‌رسند. یعنی در نامعادله $E_t\sqrt{x} \ge C$ هردو حالت تساوی و نامساوی برقرار است. بنابراین وجود هر دو شرط، الکترون‌هایی با انرژی بیش از E_t و و شرط زاویه‌ای $\theta_s \le \theta_c$ برای تشکیل برآمدگی ضروری است. پس اگر علاوه برکوچک بودن زاویهٔ پراکندگی، الکترون‌های پرانرژی با تعداد زیاد نقش بیشتری در تولید فوتون‌های چرنکوف داشته باشند، برآمدگی تشکیل می‌شود.

نشان می‌دهیم که این مکان $(r = h\theta_c)$ در محدودهٔ عمق جو $۴۰-۴۰۰\ g/cm^۲$ مستقل از عمق جو می‌باشد:

برای رابطهٔ بین h(m) و عمق $x\ (gr/cm^۲)$ در اتمسفرداریم: $h = (۶۷۴۰+۲/۵x)\ln\left(\frac{۱۰۳۰}{x}\right)$ [۱۰]. با استفاده از این رابطه و روابط (۳) و(۴) می‌توان تغییرات $h\theta_c$ را بر حسب عمق جو به‌دست آورد:

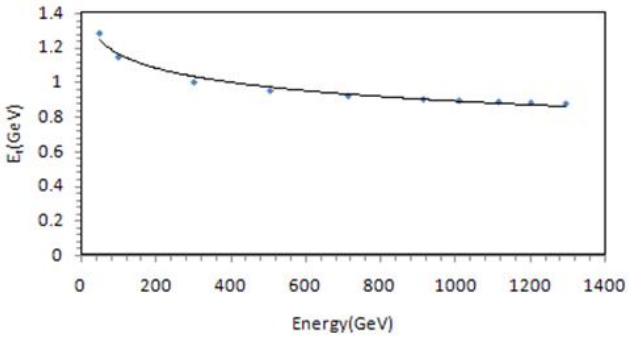
$$h\theta_c = h\sqrt{۲\eta}$$
$$= (۶۷۴۰+۲/۵x)\ln\left(\frac{۱۰۳۰}{x}\right) \qquad (۸)$$
$$\times\left[۰/۰۰۰۲۹۲۶\left(\frac{x}{۱۰۳۰}\right)\left(\frac{۲۷۳۲}{۲۰۴+۰/۰۹۱x}\right)\right].$$

طبق رابطهٔ (۸) نمودار $h\theta_c$ را بر حسب x به‌دست آورده‌ایم (شکل ۳).

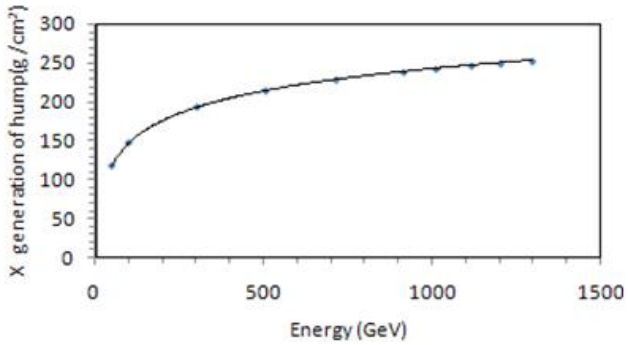
همان طور که در شکل ۳ دیده می‌شود در محدودهٔ عمق جو $۴۰-۴۰۰ g/cm^۲$ (یا ارتفاع ۷-۲۰km)، $h\theta_c$ فقط بین ۱۱۰-۱۴۰ m تغییر می‌کند. درنتیجه تمام فوتون‌هایی که در محدودهٔ عمق $۴۰-۴۰۰\ g/cm^۲$ تولید می‌شوند و دارای شرط $\theta_s \le \theta_c$ هستند در یک نقطهٔ $r = h\theta_c$ به زمین می‌رسند و اگرچه برای اولیه‌هایی با انرژی ۱۰۰GeV سهم الکترون‌های ۱/۱ GeV در عمق $۱۵۰\ g/cm^۲$ در ایجاد برآمدگی بیشتر است، اما تمام الکترون‌های در محدوده $۴۰-۴۰۰\ g/cm^۲$،(به شرط ارضای

Archive of SID

www.SID.ir



شکل۴. نمودار انرژی آستانه E_t برحسب انرژی گامای اولیه در محدوده انرژی‌های شبیه‌سازی شده (۵۰−۱۴۰۰GeV).



شکل۵. نمودار عمق مسئول hump (x) برحسب انرژی گاما در محدوده انرژی‌های شبیه‌سازی شده (۵۰−۱۴۰۰GeV).

رابطه $\theta_s \le \theta_c$) می‌توانند برآمدگی را تقویت کنند. در شکل ۴ نمودار انرژی آستانه، E_t برحسب انرژی گامای اولیه، در محدودهٔ انرژی‌های شبیه‌سازی رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود با افزایش انرژی گامای اولیه این انرژی آستانه کمتر می‌شود. دلیل این امر آن است که با افزایش انرژی اولیه، انرژی الکترون‌های ثانویه، نیز زیاد می‌شود. درنتیجه θ_s کم می‌شود و شرط آستانه با E_tهای کمتری ارضا می‌شود.

برای نقاط شکل ۴ تابع برازش شده، $y = a + b/\ln x$ می‌باشد و مقادیر پارامترهای آن را به صورت: $a = ۰/۳۸۶,\ b = ۳/۴۹۷$ به دست آورده‌ایم.

در شکل ۵ نمودار عمق مسئول برآمدگی (x) برحسب انرژی گامای اولیه در محدوده انرژی‌های شبیه‌سازی شده (۵۰−۱۴۰۰GeV) رسم شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، با افزایش انرژی اولیه عمق x مسئول برآمدگی زیاد می‌شود که با توجه به شرط $E_t \sqrt{x} = C$ و کم شدن E_t با افزایش انرژی، این افزایش واضح است.

تابع برازش شده $y = a + b \ln x$ می‌باشد و مقادیر پارامترهای مربوطه را نیز به‌دست آورده‌ایم: $a = -۴۳/۵۱۶$ و $b = ۴۱/۴۳۶$

۶ . عوامل مؤثر برشدت و محل برآمدگی

شکل‌های ۶(a) تا ۶(f) نتایج شبیه‌سازی را برای توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف در ۶ ارتفاع مربوط به رصدخانه‌های معروف دنیا و در انرژی‌های مختلف گامای اولیه نشان می‌دهند (ارتفاع هر رصدخانه در زیرنویس شکل مشخص می‌باشد).

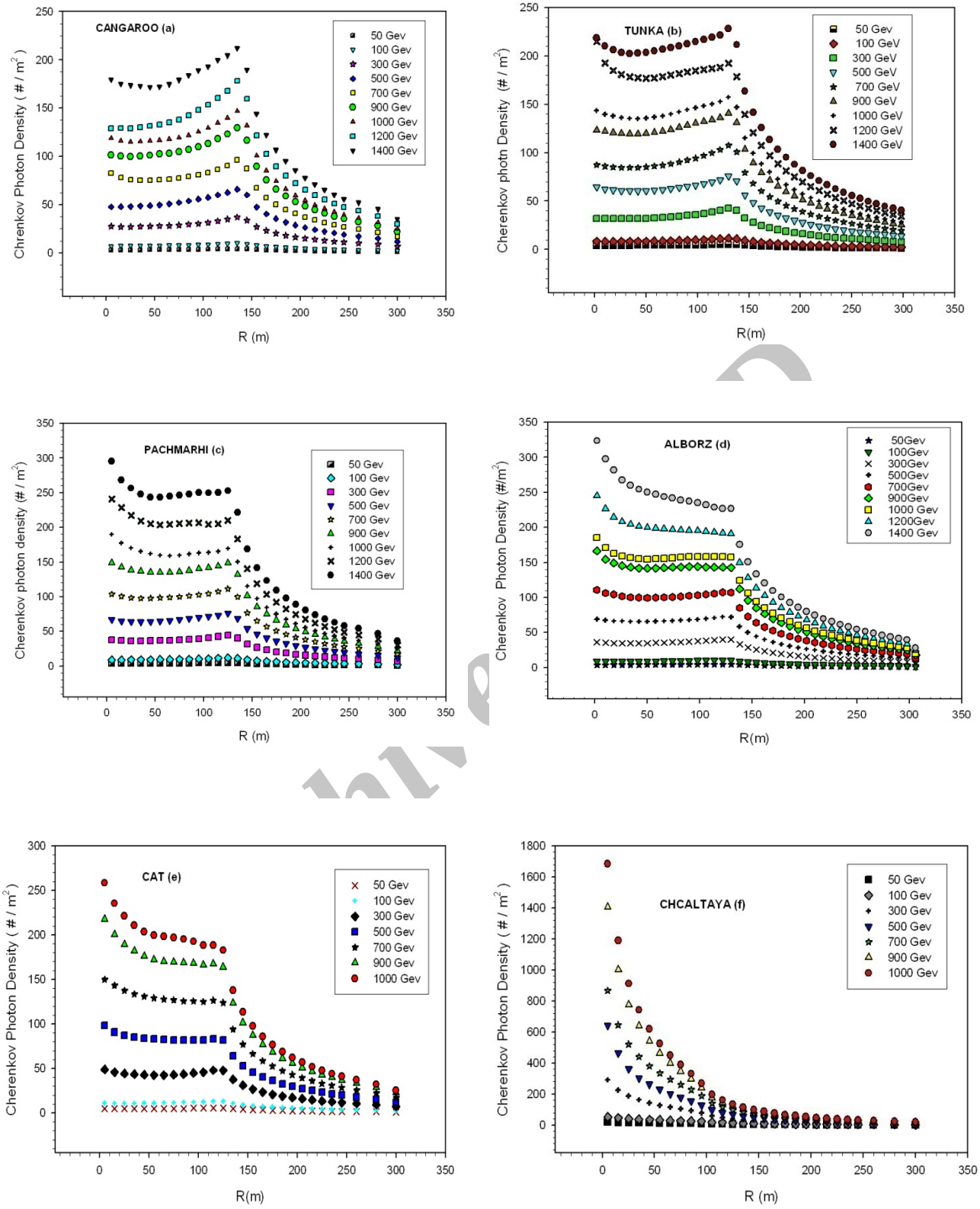
همان طور که در این شکل‌ها دیده می‌شود، مکان برآمدگی در هر رصدخانه مستقل از انرژی گامای اولیه است. اما با افزایش ارتفاع رصدخانه مکان برآمدگی به محور بهمن نزدیک‌تر می‌شود. این مطلب در شکل ۷ که نمودار مکان برآمدگی بر حسب ارتفاع سطح مشاهده را نشان می‌دهد به خوبی دیده می‌شود. نقاط در این شکل نتایج شبیه‌سازی هستند و با تابع $y = ax + y_0$ برازش شده‌اند و پارامترهای برازش $a = -۰/۰۱۲$ و $y_0 = ۱۴۰/۳۷$ می‌باشد.

با توجه به شکل ۲ این کاملاً یک اثر هندسی است، زیرا درآن شکل مشاهده می‌شود که با افزایش ارتفاع رصدخانه و نزدیک شدن عمق مسئول برآمدگی به سطح مشاهده، r کم می‌شود.

اما در مورد تأثیر انرژی برشدت برآمدگی در یک ارتفاع مشخص می‌توان دید که در رصدخانه‌های CANGAROO [۱۱] و TUNKA [۱۲] (شکل۶(a) و ۶(b)) با افزایش انرژی شدت برآمدگی بیشتر می‌شود. اما در شکل ۶(c) مربوط به رصدخانه PACHMARHI [۱۳] با افزایش انرژی اولیه شدت برآمدگی تا انرژی ۱۰۰۰GeV افزایش یافته ولی از آنجا به بعد شدت تغییر چندانی نمی‌کند. با افزایش ارتفاع رصدخانه در شکل ۶(d) مربوط به رصدخانه ALBORZ در ارتفاع ۱۲۰۰ متری از سطح دریا [۱۴ و ۱۵] مشاهده می‌شود، دراین

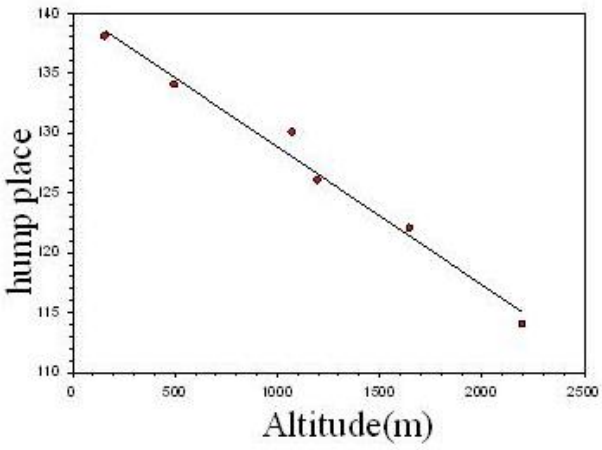
Archive of SID

www.SID.ir

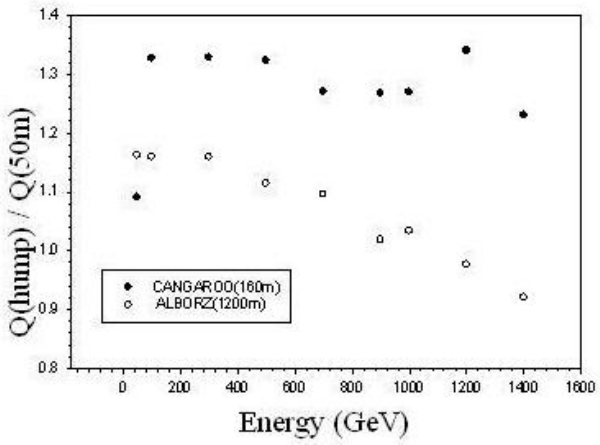


شکل ۶. توزیع عرضی فوتون چرنکوف بهمن گامای اولیه برای انرژی اولیهٔ ۵۰–۱۴۰۰GeV در ارتفاع رصدخانه‌های مختلف ((a) ۱۶۰m و (b) ۶۷۵m و (c) ۱۰۷۵m و (d) ۱۲۰۰m و (e) ۱۶۵۰m و (f) ۵۲۳۰m).

www.SID.ir



شکل۷. نمودار مکان برآمدگی بر حسب ارتفاع سطح مشاهده نقاط نتایج شبیه‌سازی هستند و خط تابع برازش شده می‌باشد .



شکل ۸. نمودار شدت برآمدگی برحسب انرژی در دو رصدخانهٔ مختلف.

ارتفاع روند افزایش شدت برآمدگی با انرژی اولیه تا انرژی ۷۰۰GeV همچنان برقرار می‌باشد ولی پس از آن در انرژی‌های بیشتر برآمدگی از شکل قله تبدیل به شکست می‌شود و شدت آن بسیار کاسته می‌شود. این بدان علت می‌باشد که در این ارتفاع (که کمی از ارتفاع‌های قبلی بیشتر است و به بیشینه بهمن نزدیک‌تر می‌باشد)، فوتون‌های چرنکوف تا انرژی خاصی مانند قبل می‌باشند ولی در انرژی‌های بیشتر، چون از بیشینه بهمن تا سطح مشاهده، فاصله کمتری طی می‌کنند؛ انرژی خود را کمتر ازدست می‌دهند. بنابراین کل فوتون‌های چرنکوف در همه فواصل (نه فقط در برآمدگی) دارای انرژی زیاد بوده (و نیز زاویه پراکندگی کمتر و زاویه چرنکوف بزرگتری دارند، یعنی هر دو شرط تولید برآمدگی را دارا می‌باشند) و این تعداد زیاد، نقش فوتون‌های پرانرژی مولد برآمدگی را می‌کاهد و برآمدگی تحت تأثیر فوتون‌های دیگر، از بین می‌رود.

اگر شدت برآمدگی ، P را به صورت نسبت چگالی فوتون‌های چرنکوف در محل برآمدگی به چگالی فوتون‌ها در فاصله ۵۰ متری از محور بهمن تعریف کنیم، $P=\frac{Q_{hump}}{Q_{50}}$، نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که در ارتفاع‌های کم با افزایش انرژی، شدت برآمدگی زیاد می‌شود اما در ارتفاع‌های زیاد به دلایلی که قبلاً اشاره شد، با افزایش انرژی، شدت برآمدگی کم می‌شود. این مطلب در شکل ۸ که در آن تغییرات شدت برآمدگی با انرژی برای دو ارتفاع مختلف، به‌دست آمده است، به خوبی مشاهده می‌شود. همان طور که در شکل دیده می‌شود، در رصدخانه ALBORZ برخلاف CANGAROO با افزایش انرژی، شدت برآمدگی کم می‌شود. شکل(e)۶ همان توزیع را برای رصدخانه CAT [۱۶] در ارتفاع ۱۶۵۰ متری را نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود برآمدگی فقط در انرژی‌های کمتر از ۵۰۰GeV وجود دارد وبعد از آن از شدت آن کاسته می‌شود.

و بالاخره در شکل (f)۶ توزیع عرضی نور چرنکوف بهمن گامای اولیه با انرژی اولیه ۵۰−۱۴۰۰GeV در ارتفاع ۵۲۳۰ متری از سطح دریا یا در عمق جو ۵۳۶ g/cm^2 (ارتفاع رصدخانه CHACALTAYA [۱۷])، شبیه‌سازی شده است. در این ارتفاع که بسیار زیاد می‌باشد، دیگر اثری از برآمدگی نیست. در این حالت، آن قدر ارتفاع زیاد است که به بیشینه بهمن بسیار نزدیک می‌باشد و در نتیجه، چگالی ذرات مولد چرنکوف و سپس فوتون‌های چرنکوف، بیشتر می‌شود. بنابراین برآمدگی در این گستره وسیع ذرات، ناپدید می‌شود.

۷. نتیجه‌گیری

وجود برآمدگی در توزیع عرضی فوتون‌های چرنکوف مربوط به پرتو اولیه گاما مشخصه مهمی است که قابلیت تفکیک پرتوهای اولیه گاما از هادرون‌ها را ممکن می‌سازد.

Archive of SID

www.SID.ir

محل برآمدگی کاملاً مستقل از انرژی پرتو اولیه گاما می‌باشد ولی با افزایش ارتفاع رصدخانه به محور بهمن نزدیک می‌شود. شدت برآمدگی نیز در رصدخانه‌های کم ارتفاع با افزایش انرژی زیاد می‌شود ولی در رصدخانه‌های مرتفع با افزایش انرژی شدت برآمدگی کم می‌شود تا حدی که در رصدخانه‌های مرتفع در انرژی‌های زیاد برآمدگی اصلاً مشاهده نمی‌شود. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از این تکنیک در رصدخانه‌های مرتفع فقط در انرژی‌های کم ممکن است.

مراجع

1. A Mishev, J Stamenov, *ICRC*, **6** (2005) 109M.
2. D Heck et al., *Report FZKA* (1998) 6019, Forschungszentrum Karlsruhe; http://www-ik.fzk.de/corsika/physicsdescription/ corsika phys .html.
3. http://www.ngdc.noaa.gov/seg/geomag/magfield.shtml

۴. گوهر رستگار زاده، مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، **۶**، شماره۲، تابستان (۱۳۸۵).

5. D Chernov, E Korosteleva, *Int. J. Mod. Phys*. A **20** (2006) 6799-6801.
6. A A Ivanov, S P Knurenko, arXiv: 0902. 1016v1 [astro-ph.HE] (2009).
7. G Rastegaarzadeh, J Samimi, *JPhG*. **27** (2001) 2065R.
8. J R Patterson, A Hillas., *J. Phys*. G: *Nucl Phys* **9** (1983) 1433.
9. C E Portocarrero, F Arqueros, *J. Phys*. G: *Nucl Part. Phys* **24** (1998) 235.
10. M V Rao. S Sinha, *J. Phys*. G: *Nucl Phys* **14** (1988) 811-827.
11. M Ohishi et al., *APh*, **30**, 2 (2008) 47-53.
12. D V Chernov et al., *ICRC*. **2** (2001) 585C.
13. P Majumdar et al., *APh*, **18,** 4 (2003) 333.
14. M Bahmanabadi et al., *PASA*. **23**(3) (2006) 129.
15. M Bahmanabadi, J Samimi, *J. Phys. Rev. D* **76** (2007) 082002.
16. G Mohanty, *ICRC*, **3** (1999) 452 M.
17. S Cht. Mavrodiev et al., *NIM* **530** (2004) 359.

Archive of SID

www.SID.ir