

(EAS)

(دریافت مقاله: ۱۳۸۸/۳/۱۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۸۹/۱/۸)

CORSIKA

QGSJET01, QGSJETII, DPMJET, SIBYLL

CORSIKA

بیشینه مقدار خود می‌رسد که در این نقطه شامل بیشترین تعداد الکترون در طول توسعه خود می‌باشد. تعداد ذرات نیز بعد از عمق بیشینه به صورت نمایی کاهش می‌یابد. عمق بیشینه بهمن هوایی یکی از مهم‌ترین عوامل برای تشخیص ترکیب جرمی پرتو کیهانی اولیه می‌باشد.

دو شیوه اساسی در آزمایش‌های بهمن‌های هوایی به کار می‌رود: اول اینکه باقی مانده ذرات آبشار در روی سطح زمین در آرایه‌های بزرگ آشکار سازی می‌شوند که الکترون‌ها میون‌ها و هادرون‌ها و به‌طور کلی توزیع ذرات را در روی سطح زمین اندازه‌گیری می‌کنند. روش دوم، روش کالریمتری است که در این روش توسعه طولی بهمن را به وسیله ثبت نور چرنکوف یا فلورسنت، که به وسیله ذرات بهمن در اتمسفر تولید می‌شود بررسی می‌کنند و سرانجام عمق بیشینه به دست می‌آید. در کنار روش‌های مستقیم ذکر شده در بالا، شبیه‌سازی نیز برای بررسی

پرتوهای کیهانی با انرژی‌های بیشتر از 10^{14} eV به وسیله آشکار سازی اجزای مختلف بهمن‌های هوایی گسترده بررسی می‌شوند. پرتوهای کیهانی با انرژی‌های فوق العاده زیاد در هنگام ورود به جو با هسته مولکول‌های هوا اندرکنش می‌کنند و برخی نیز واپاشیده می‌شوند. حاصل این اندرکنش‌ها و واپاشی‌ها تولید ذرات ثانویه در جو می‌باشد. قسمت اعظم این ذرات، ذرات الکترومغناطیسی هستند که از واپاشی ذرات π^0 تولید می‌شوند. ذرات π^0 در اولین مراحل اندرکنش پرتوهای کیهانی با هسته‌های هوا تولید می‌شوند. کسر قابل توجهی از انرژی پرتوکیهانی اولیه در مراحل آغازین توسعه بهمن هوایی به قسمت الکترومغناطیسی بهمن گسترده هوایی (EAS) منتقل می‌شود. شاخه هادرونی بهمن هوایی، انرژی خود را به صورت نمایی از دست می‌دهد. هر بهمن هوایی در عمقی از جو به

انرژی انتقال داده شده به درون ذرات ثانویه (ناکشسانی K) نام برد [۴]. افزایش در سطح مقطع ناکشسانی سبب توسعه زودتر آبشار می شود و ذرات در برخوردها انرژی بیشتری را از دست می دهند، از این رو بهمن هوایی زودتر به بیشینه خود در اتمسفر می رسد. هر گاه در اولین اندرکنش ها تعداد ذرات کمتری تولید شود، به علت بقای انرژی ذرات تولید شده بسیار پر انرژی خواهند شد و بهمن هوایی به آرامی توسعه می یابد در نتیجه بیشینه بهمن هوایی در عمق بیشتری ایجاد می شود. همچنین هر چه پرتوکیهانی وارد شده دارای انرژی بالاتری باشد نفوذ بیشتری در اتمسفر خواهد داشت. برای هسته های سنگین تر احتمال برخوردها و اندرکنش ها با هسته های هوا بالا می رود و این امر سبب می شود تا بهمن های تولید شده نفوذ کمتری در اتمسفر داشته باشند. پاجاریس^۱ یک پارامتر بندی به صورت زیر برای ارتباط تغییرات عمق بیشینه به عنوان تابعی از تغییرات تعداد میون و K استنتاج کرده است [۲]:

$$\Delta X_{max}/X_{max} \approx - (1/2) \Delta N_{\mu}/N_{\mu} - (1/10) \Delta K/K. \quad (1)$$

در عمق بیشینه بهمن های هوایی شبیه سازی شده به وسیله مدل های اندرکنشی مختلف نیز تفاوت هایی دیده می شود. مهم ترین عامل برای وجود این تفاوت ها، تفاوت در سطح مقطع ناکشسان تعیین شده برای مدل ها است.

سطح مقطع های ناکشسان هوا - پروتون را که از طریق برون یابی به انرژی های بالاتر توسط هک^۲ به دست آمده را می توان در شکل ۱ دید. نتایج تجربی به دست آمده نیز برای مقایسه آورده شده است. مقادیری که به وسیله هوندا^۳ به دست آمده است در بازه انرژی eV^{۱۰^{۱۶}} تا eV^{۱۰^{۱۷}} مدل نکسوس^۴ را تأیید می کند. مقادیری که به وسیله یوده^۵ به دست آمده کمتر از تمام مدل ها می باشد. همان طور که ملاحظه می شود تا انرژی eV^{۱۰^{۱۴}} سطح مقطع ناکشسان مدل DPMJET بزرگ تر از سایر مدل هاست. اگر سایر پارامترها را نادیده بگیریم، انتظار می رود

بهمن های هوایی وجود دارد. بدین منظور اغلب بسته نرم افزاری CORSIKA به کار می رود. مدل های اندرکنش هادرونی مختلفی برای این شبیه سازی ها استفاده می شود که ما در اینجا از چهار مدل شبیه سازی استفاده کرده ایم که هر چهار مدل از مدل های اندرکنش انرژی های فوق العاده زیاد هستند.

تحقیقات انجام یافته نشان می دهد که مدل QGSJET01 نتایج سازگارتری را نسبت به سایر مدل ها با نتایج تجربی نشان می دهد [۱]. تاکنون بررسی های فراوانی بر روی عمق متوسط بیشینه بهمن های هوایی و عوامل مؤثر بر آن انجام گرفته که یکی از مفصل ترین آنها را می توان در [۲] دید که توسط Jörg R. Hörandel انجام شده است و در آن تأثیر سطح مقطع ناکشسان بر عمق متوسط بیشینه بهمن های هوایی که به وسیله مدل های مختلف تولید شده اند به تفصیل بررسی شده است. برای به دست آوردن این پارامتر (سطح مقطع ناکشسان) ابتدا سطح مقطع پروتون - پروتون از آزمایش های شتاب دهنده های زمینی به دست می آید و از نتایج این آزمایش ها و با توجه به ضریب میرایی این سطح مقطع ها تبدیل به سطح مقطع های پروتون - هوا می شود. مدل های شبیه سازی قدیمی تر تناقضات فراوانی با نتایج تجربی داشتند و جرم لگاریتمی متوسط که از این پارامتر استخراج می شد با مقدار واقعی آن سازگاری نداشت که در مدل های تصحیح شده فعلی این تناقضات تا حدودی رفع شده اند [۲ و ۳]. با توجه به این یافته ها در این مقاله سعی شده که عوامل مؤثر بر عمق بیشینه بهمن های هوایی و رابطه این پارامتر با تعداد ذرات مشاهده شده در سطح زمین بررسی شود.

عمق بیشینه نقطه ای است که یک بهمن هوایی در مدت گسترش طولی خود شامل بیشترین تعداد الکترون می باشد. توسعه طولی یک بهمن هوایی به کمیت های فیزیکی گوناگونی وابسته است که از میان آنها می توان از سطح مقطع برخورد ناکشسان σ_{inel} ذرات اولیه و ثانویه با هوا، فراوانی متوسط ذرات تولید شده در یک برهم کنش، فراوانی میون ها و کسرم متوسط

۱. Pajares

۲. D. Heck

۳. Honda

۴. Nexus

۵. Yodh

انرژی شاخه هادرونی به صورت نمایی کاهش می‌یابد و انرژی باقیمانده در اجزای هادرونی به صورت

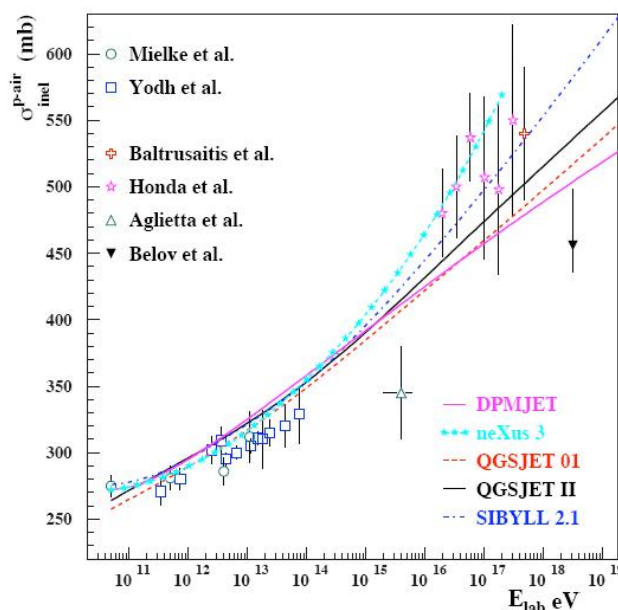
$$E_h(X) = E_0 (3/1 - 1/k)^X / \lambda_h$$

داده می‌شود که در اینجا E_0 انرژی اولیه پرتو کیهانی، X عمق جو، $k/3$ کسر انرژی وارد شده به داخل اجزای الکترومغناطیسی بهمن هوایی و λ_h متوسط پوشش آزاد یا فاصله مکانی بین دو اندرکنش متوالی می‌باشد. در این رابطه برای برخی مدل‌های اندرکنشی، $k \approx 0/6$ و $\lambda_h \approx 55 \text{ g/cm}^2$ اختیار می‌شوند [۴].

در مدل‌های QGSJET01, SIBYLL, DPMJET مابین جرم لگاریتمی متوسط پیشگویی شده با این مدل‌ها و مشاهدات تجربی اختلافات زیادی وجود داشت. در این مدل‌ها ضریب ناکشسانی (K) تقریباً در حدود ۰/۶ اختیار شده بود و این امر باعث شده بود که تعداد الکترون‌ها کمتر از مقدار واقعی به دست آید و مقدار جرم لگاریتمی متوسط به دست آمده بیشتر از مقدار واقعی آن باشد [۵].

برای پرتوهای کیهانی با جرم‌های گوناگون نیز مدل‌ها رفتارهای متفاوتی را در تعداد ذرات باردار (الکترون‌ها) در نقطه بیشینه نشان می‌دهند. بررسی‌های قبلی در این مورد توسط کنب^۲ و همکاران انجام گرفته است. مدل‌های قدیمی‌تر در سال ۱۹۹۷ تفاوتی را در حدود ۷/۵ درصد تفاوت را برای پروتون‌ها و ۵/۵ درصد برای آهن نشان می‌دهند حال آنکه مدل‌های نسبتاً جدیدتر در سال ۲۰۰۰ این تفاوت‌ها به کمتر از یک درصد رسانیده‌اند. با اینحال تفاوت‌ها کماکان باقی است [۶].

برای مثال مدل‌های (SIBYLL, DPMJET) تعداد میون‌ها را بیشتر از آنچه در EAS وجود دارد نشان می‌دهند، چون میون‌ها و هادرون‌ها محصولات آبخارهای هادرونی هستند پس روشن است که در ابتدای توسعه بهمن هوایی سهم انرژی اختصاص یافته به شاخه هادرونی بیشتر از مقداری است که در EAS اختصاص داده می‌شود. انرژی بیشتر سبب می‌شود که بهمن‌های هوایی که با این مدل‌ها شبیه‌سازی می‌شوند به اعماق بیشتری در اتمسفر نفوذ کنند. برخلاف این مدل‌ها، مدل QGSJET01 نتایج نسبتاً سازگارتری را با مشاهدات تجربی نشان می‌داد. به



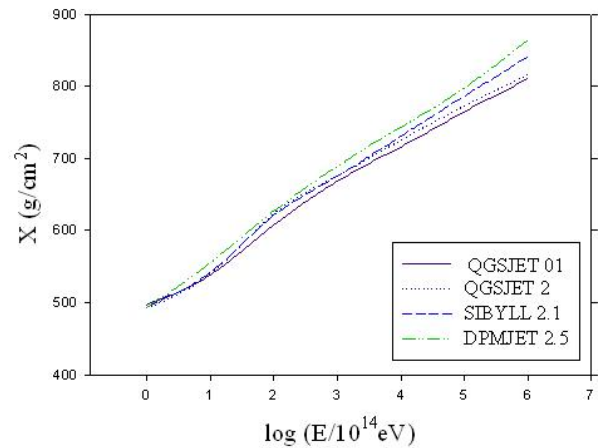
شکل ۱. سطح مقطع‌های ناکشسان برخوردی پروتون - هوا که توسط یک به وسیله برون یابی برای مدل‌های مختلف به دست آمده است.

که بهمن‌های هوایی که در این بازه انرژی توسط مدل مذکور تولید می‌شوند کمترین نفوذ را در اتمسفر داشته باشند. پس از این بازه مدل DPMJET کمترین مقدار سطح مقطع ناکشسان را دارد و بنابراین بیشترین نفوذ را در میان مدل‌ها خواهد داشت. همان‌گونه که قبلاً هم اشاره شد عمق بیشینه یک بهمن هوایی یکی از مهم‌ترین عوامل در شناسایی ترکیب جرمی پرتو کیهانی اولیه است و سطح مقطع‌های ناکشسان گوناگون که برای مدل‌های مختلف اختیار شده است، سبب بروز اختلافاتی در پیشگویی مدل‌ها در مورد ترکیب جرمی پرتو کیهانی اولیه است [۲]. عمق بیشینه بیشتر، جرم لگاریتمی متوسط پرتوکیهانی اولیه را کوچک‌تر نشان می‌دهد. در انرژی‌های بالاتر از 10^{20} eV مدل‌ها جدایی بزرگ‌تری را در مقادیر σ_{inel} نشان می‌دهند. سطح مقطع ناکشسان در تمام مدل‌ها با افزایش انرژی افزایش می‌یابد. در حال حاضر تفاوت سطح مقطع‌ها بین مدل‌ها از ۸۰ mb به ۲۰ mb در محدوده انرژی چند PeV رسیده است. برون یابی به انرژی‌های بالاتر از 10^{21} GeV با پیش بینی‌های آزمایش‌های رصد خانه پیر اوژه^۱ سازگار است [۴].

مشاهده می‌توان در مورد نوع اولیه نتیجه‌گیری کرد. در واقع نسبت $N_{\text{H}}/N_{\text{e}}$ در ثانویه‌های هسته‌های سنگین‌تر بزرگ‌تر از این نسبت در مورد پروتون است و در مقابل تعداد هادرون‌های ثانویه (N_{H}) برای هسته‌های سنگین‌تر کمتر از این تعداد برای اولیه پروتون است. اما مقادیر تجربی به دست آمده برای N_{H} و N_{H} کمتر از مقادیری است که مدل‌های مختلف در شبیه‌سازی پیش بینی می‌کنند [۵]. با توجه به این تناقضات مدل QGSJET01 اصلاح و نسخه جدید آن یعنی QGSJETII عرضه شد. در این مدل تمام عوامل ذکر شده فوق لحاظ شد. از جمله تصحیحات اعمال شده، افزایش کسر انرژی منتقل شده K_{p}^{N} به داخل شاخه الکترومغناطیسی از 0.2 به 0.26 بود. حاصل این تغییر این بود که انرژی میون در سطح دریا در حدود 6 درصد کاهش یافت، انرژی هادرون 23 درصد کاهش و انرژی منتقل شده به اجزای الکترومغناطیسی 2 درصد افزایش یافت.

با وجود افزایش انرژی منتقل شده به داخل اجزای الکترومغناطیسی، انرژی الکترومغناطیسی حفظ شده و تعداد الکترون بهمن در سطح دریا در حدود 14 درصد کاهش یافته بود که ناشی از توسعه سریع و میرایی سریع‌تر آبشار است. برای حل این مشکل نرخ کشسانی برخوردی شاخه هادرونی و الکترومغناطیسی افزایش داده شد. افزایش نرخ کشسانی سبب کند شدن توسعه بهمن هوایی در مراحل اولیه توسعه اش و نفوذ عمیق‌تر بهمن‌های شبیه‌سازی شده با این مدل و کسب نتیجه دلخواه می‌شود [۵].

برای بررسی نتایج تصحیحاتی که در مدل QGSJETII انجام گرفت، ما شبیه‌سازی را برای 4 مدل QGSJET01، QGSJETII، DPMJET2.55 و SIBYLL2.1 و برای بازه انرژی 10^{14} eV تا 10^{20} eV انجام دادیم. برای هر مدل تعداد 300 بهمن هوایی شبیه‌سازی شده است و شبیه‌سازی‌ها تنها برای پرتوکیهانی اولیه پروتون انجام گرفت. نتایج حاصل برای عمق پیشینه بهمن‌های شبیه‌سازی شده در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با اعمال تصحیحات عمق

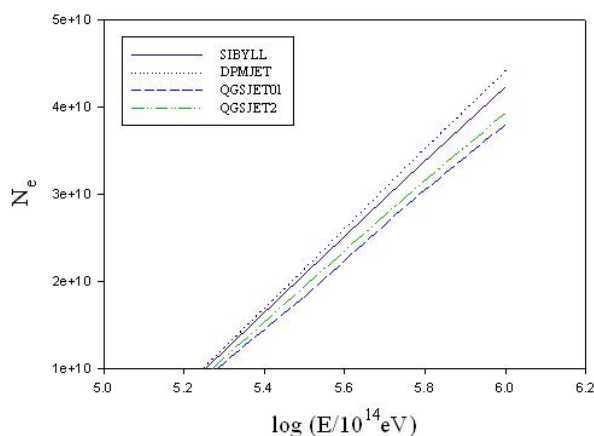


شکل ۲. عمق ماکزیمم بهمن‌های شبیه‌سازی شده به وسیله مدل‌های QGSJET01، QGSJET2، QGSJETII، SIBYLL و DPMJET.

خصوص نسخه‌ای از آن که با نام $3a$ مشخص شده بود و در آن تکانه قطع متوسط نسبت به QGSJET01 اصلی کاهش یافته و کشسانی افزایش یافته بود بیشترین توافق را با نتایج تجربی داشت که قبلاً توسط هوراندل^۱ به تفصیل بررسی شده است [۲]. اما این مدل نیز نارسایی‌هایی داشت از جمله اینکه مشابه دو مدل قبلی و اما نه به همان اندازه تعداد مشاهده شده میون‌ها در سطح زمین را بیشتر و تعداد الکترون‌ها را کمتر نشان می‌داد. به خصوص در انرژی‌های 10^{14} eV تا 10^{15} eV این مقدار بسیار برجسته می‌باشد. با وجود این تفاوت‌ها، ترکیب جرمی که از پیشگویی این مدل‌ها با توجه به فراوانی ذرات مشاهده در سطح زمین به دست می‌آمد، با نتایج تجربی تناقضاتی داشت. به خوبی از مدل‌های حاضر استنباط شده که برای انرژی‌های اولیه یکسان تعداد میون‌ها در بهمن‌های حاصل از هسته‌های سنگین‌تر، بیشتر از بهمن‌های حاصل از پروتون است. از سوی دیگر تعداد الکترون‌ها و هادرون‌ها در بهمن‌های حاصل از هسته‌های سنگین‌تر کمتر از پروتون است. میون‌های بهمن‌های هوایی آهن همواره بیشتر از بهمن‌های پروتون می‌باشد. اما برای الکترون‌ها فراوانی‌ها همان‌گونه که ذکر شد بعد از نیمه اتمسفر برای آهن و پروتون معکوس می‌شوند [۴].

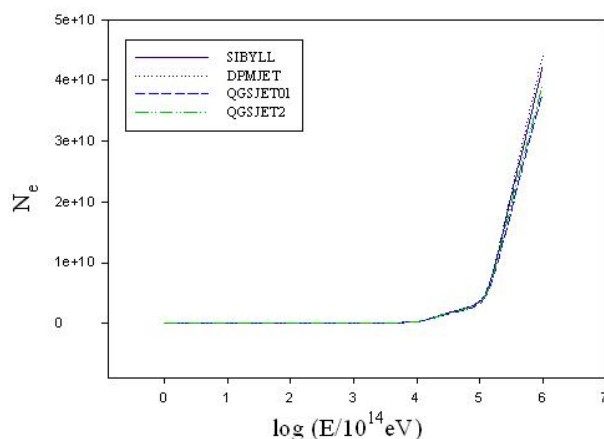
اگر امکان این وجود داشته باشد که انرژی ذره اولیه به وسیله تکنیک چرنکوف یا روش‌های دیگر به طور مستقل اندازه‌گیری شود، آنگاه از روی نسبت $N_{\text{H}}/N_{\text{e}}$ و تعداد هادرون‌ها (N_{H}) در سطح

۱. Jörg R. Hörandel



شکل ۴. نمودار فراوانی الکترون‌ها برای بهمن‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های SIBYLL، DPMJET، QGSJET2، QGSJET01 و SIBYLL در بازه انرژی 10^{19} تا 10^{20} eV در این مقیاس رفتار متفاوت مدل‌ها در انرژی‌های بسیار بالاتر دیده می‌شود.

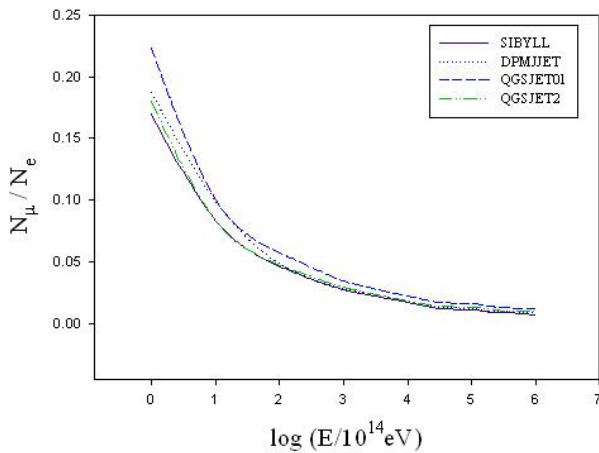
زمین شده است. از جمله اینکه تعداد الکترون‌ها در روی سطح زمین برای بهمن‌هایی که با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شده‌اند افزایش یافت. همان‌گونه که در شکل ۳ می‌توان دید، بهمن‌های شبیه‌سازی شده با مدل DPMJET بیشترین تعداد الکترون را در روی سطح زمین تولید می‌کنند. در انرژی‌های پایین تمامی مدل‌ها پیش‌بینی‌های یکسانی در این مورد دارند. هیچ رفتار غیر عادی در مورد الکترون‌های تولید شده به وسیله مدل‌ها دیده نمی‌شود. اما در انرژی‌های قوزک ($E \geq 10^{18}$ eV) که پرتوهای کیهانی موجود در این منطقه از انرژی (10^{19} تا 10^{20} eV) دارای ماهیت ماورای کهکشانی و ناشناخته می‌باشند جهش بزرگی در تعداد ذرات موجود در بهمن‌های شبیه‌سازی شده به خصوص الکترون‌ها دیده می‌شود. شکل ۴ فراوانی الکترون‌های پیش‌بینی شده توسط مدل‌های مختلف را در بازه انرژی 10^{18} تا 10^{20} eV نشان می‌دهد. مابین مدل‌ها نیز در این منطقه از انرژی اختلاف چشمگیری از نظر تعداد الکترون‌ها وجود دارد. از جمله اینکه بین مدل‌های QGSJET01 و DPMJET اختلافی در حدود $6/1 \times 10^9$ در تعداد الکترون‌ها وجود دارد. از این رفتار غیرعادی مدل‌ها این‌گونه برداشت می‌شود که هنوز درک درستی از اندرکنش‌های هادرونی و الکترومغناطیسی در این منطقه از انرژی وجود ندارد به



شکل ۳. نمودار فراوانی الکترون‌ها برای بهمن‌های شبیه‌سازی شده توسط مدل‌های SIBYLL، DPMJET، QGSJET2، QGSJET01 و SIBYLL.

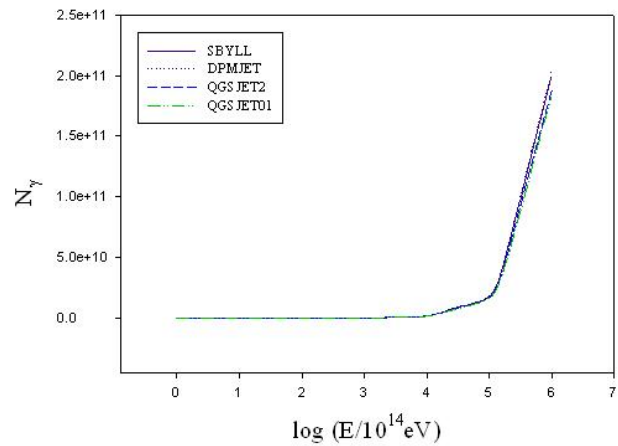
نقاط بیشینه بهمن‌هایی که به وسیله مدل QGSJETII شبیه‌سازی شده‌اند در حدود 10^7 تا 20 g/cm² نسبت به مدل QGSJET01 کاهش یافته است (کمترین فاصله بین این دو مدل در انتهای بازه و بیشترین آن در ابتدای بازه اتفاق می‌افتد). مدل DPMJET بیشترین نفوذ (بیشترین X_{max}) را دارد و در انرژی 10^{20} eV عمق نفوذ آن به $864/88$ g/cm² می‌رسد. به علت این عمق فوق العاده زیاد انتظار می‌رود که بهمن‌های هوایی شبیه‌سازی شده با این مدل بیشترین تعداد ذره را در سطح زمین تولید کنند که در ادامه بررسی خواهد شد. با توجه به اینکه مدل DPMJET کمترین مقدار سطح مقطع ناکسسان را دارد پس نفوذ بیشتر آن نسبت به سایر مدل‌ها دور از انتظار نیست. مدل SIBYLL بعد از مدل DPMJET بیشترین نفوذ را در اتمسفر دارد و به تبع آن انتظار می‌رود که از لحاظ تعداد ذرات مشاهده شده در روی سطح زمین در رتبه دوم باشد. شیب نمودارهای دو مدل QGSJET01 و QGSJETII در سراسر بازه انرژی کاملاً شبیه به هم می‌باشد. در انرژی 10^{20} eV ما بین مدل‌های QGSJET01 و DPMJET اختلاف عمقی در حدود $54/23$ g/cm² وجود دارد که اختلاف قابل توجهی می‌باشد.

تصحیحاتی که در مدل QGSJETII انجام گرفته است، باعث تغییر فراوانی ذرات بهمن‌های شبیه‌سازی شده، در روی سطح



شکل ۶. نسبت تعداد میون‌ها به الکترون‌ها در بهمن‌های شبیه‌سازی شده به وسیله مدل‌های SIBYLL، QGSJET2، QGSJET01 و DPMJET در بازه انرژی 10^{14} eV تا 10^{20} eV.

SIBYLL ترکیب جرمی سبک تری تولید می‌کند چون نسبت N_{μ}/N_e در آن از تمام مدل‌های دیگر کمتر است. در این میان مدل QGSJETII مابین این دو مدل قرار دارد یعنی ترکیب جرمی را که پیش بینی می‌کند اندکی از مدل QGSJET01 سبک‌تر و از مدل SIBYLL سنگین‌تر است. در انتهای بازه تمامی مدل‌ها رفتارهای بسیار مشابهی را نشان می‌دهند. مابین 10^{15} تا 10^{16} الکترون ولت دو مدل SIBYLL و QGSJETII رفتارهای کاملاً یکسانی را نشان می‌دهند. نمودار مدل QGSJET01 در محدوده انرژی 10^{14} تا 10^{16} الکترون ولت شیب تندی دارد، همچنین جرم متوسط لگاریتمی پیش بینی شده با توجه به فراوانی ذرات مشاهده شده توسط آزمایش‌های تجربی که به وسیله این مدل انجام گرفته، در بازه انرژی فوق به شدت افت می‌کند در حالی که در مدل‌های SIBYLL و DPMJET این افت دیده نمی‌شود [۲]. ممکن است علت این که در انرژی‌های نسبتاً پایین این بازه تعداد میون‌ها در مقایسه با الکترون‌ها بیشتر است این باشد که اکثر تولیدات میون در نسل‌های انتهایی بهمن‌های هوایی انجام می‌شود و چون انرژی پایون‌های تولید شده در انرژی‌های قوزک در هنگام رسیدن به آشکارسازها بسیار بیشتر از انرژی آستانه آشکارسازهای میون (20 MeV) می‌باشد تولیدات بعدی میون‌ها که ممکن است پس از سطح آشکارسازی اتفاق



شکل ۵. تعداد پرتوهای گاما تولید شده در بازه انرژی 10^{14} تا 10^{20} eV.

خصوص این‌که از لحاظ تجربی تعداد بسیار محدودی از پرتوهای کیهانی در این منطقه از انرژی دیده شده است و این امر باعث می‌شود ما نتوانیم اندرکنش‌ها را در این منطقه از انرژی به صورت کامل مطالعه کنیم. این مدل‌ها علاوه بر الکترون‌ها در مورد سایر ذرات موجود در بهمن‌های هوایی در این محدوده انرژی نیز رفتار مشابهی نشان می‌دهند. پرتوهای گاما، پروتون‌ها و دیگر ذرات نیز در این منطقه از انرژی به فراوانی تولید می‌شوند. برای مثال شکل ۵ فراوانی پرتوهای گاما در بازه انرژی 10^{14} eV تا 10^{20} eV را نشان می‌دهد. تعداد الکترون‌ها و پرتوهای گاما با یکدیگر متناسب هستند.

پارامتر دیگری که ما را در شناسایی ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی یاری می‌دهد، نسبت میون‌ها به الکترون‌ها در بهمن‌های هوایی گسترده می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در انرژی 10^{14} eV در این مورد اختلاف چشمگیری ما بین مدل‌ها وجود دارد و تا انرژی 10^{16} eV شیب نمودارها به سرعت افت می‌کند. پس از این انرژی و تا حدود انرژی 10^{20} eV از شیب نمودارها کاسته می‌شود. در تمام طول بازه، مقادیر این نسبت برای مدل QGSJET01 بیشتر از سایر مدل‌هاست. همین امر سبب می‌شد که ترکیب جرمی را که این مدل پیشگویی می‌کند سنگین‌تر از سایر مدل‌ها باشد. چون ترکیب جرمی سنگین‌تر تعداد میون‌ها را در نیمه پایینی اتمسفر به نسبت الکترون‌ها، بیشتر تولید می‌کند. در عوض مدل

ذرات در محدوده انرژی ماورای کیهکسانی هنوز نامعلوم است و نیاز به تحقیقات گسترده‌تری دارد. اگر تعداد بیشتری پرتو کیهانی در این منطقه ثبت شوند با قطعیت بیشتری می‌توان در این مورد بحث و تحقیق کرد. در مورد نقطه بیشینه بهمن‌های هوایی، بهمن‌های شبیه‌سازی شده با مدل QGSJETII به خوبی انتظارات را برآورده کرده است و در حدود ۲۰ تا 30 g/cm^2 نسبت به مدل QGSJET01 عمیق‌تر در اتمسفر نفوذ می‌کنند. همین امر باعث می‌شود تا پیشگویی در مورد ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی با دقت بیشتری انجام شود. امیدها بر این است که در آینده‌ای نزدیک مدل‌های پیشرفته‌تری منتشر شوند و با بررسی همه جانبه نتایج تجربی، رفتار دقیق بهمن‌های هوایی را در انرژی‌های به غایت پرنرژی با دقت بیشتری شبیه‌سازی کرد.

بیفتد به ثبت نمی‌رسد. به علت رقابت بین اندرکنش و واپاشی، اغلب میون‌ها محصولات واپاشی مزون‌هایی هستند که در اندرکنش‌های انرژی پایین تولید شده‌اند. به همین خاطر در شبیه‌سازی، استفاده از مدل‌های اندرکنشی انرژی پایین که به خوبی با داده‌های شتابدهنده‌ها منطبق باشند سودمند خواهد بود [۷]. شاید قرار دادن آشکارسازها در زیر سطح زمین برای ثبت تعداد نهایی میون‌ها راه حلی برای این مسئله باشد چون میون‌ها تا اعماقی از زمین نیز نفوذ می‌کنند.

از بین مدل‌هایی که در این مقاله بررسی شدند، به نظر می‌رسد مدل QGSJETII بیشترین سازگاری را با نتایج تجربی داشته باشد. علت تولید مقدار فوق العاد زیاد الکترون‌ها و سایر

4. M Risse, *Acta Physica Polonica B*, **35**, 6 (2004) 1787.
5. A D Erlykin, A W Wolfendale, *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, **122** (2003) 368-371.
6. J Knapp et al., **19**, 1(2003) 77-99.
7. C Meurer, J Bluemer, R Engel, A, Haungs, M Roth, "Muon production in extensive air showers and its relation to hadronic interactions," eprint, arXiv:astro-ph/0512536, 12/2005.

1. S Ostapchenko, QGSJET-II: Results for extensive air showers, eprint, arXiv:astro-ph/0412591(2004).
2. Jörg R Hörandel, *Nuclear and Particle Physics*, **29** 11, (2003) 2439-2464.
3. T Pierog, R Engel, D Heck, S Ostapchenko and K Werner, Latest Results from the Air Shower Simulation Programs CORSIKA and CONEX, eprint arXiv:0802.1262, 02/2008.