

مطالعه اندرکنش پرتوهای کیهانی بغایت پرنرژی با فوتون‌های پس‌زمینه

کیهانی توسط کُد شبیه‌سازی CRPropa 3.0

گوهر رستگارزاده*، هاجر فلاح‌نژاد

دانشکده فیزیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

دریافت: 1396/09/28 ویرایش نهائی: 1396/11/24 پذیرش: 1396/12/13

چکیده

در این مقاله با استفاده از کُد شبیه‌سازی CRPropa3.0 به بررسی طیف ذرات ثانویه تولید شده در اندرکنش پرتوهای کیهانی بغایت پرنرژی، با فوتون‌های پس‌زمینه می‌پردازیم. اندرکنش‌ها در محدوده انرژی 10^{18}eV تا 10^{21}eV و برای دو حالت ترکیب جرمی اولیه آهن و پروتون، بررسی شده‌اند. تأثیر تغییر انرژی ذرات اولیه، و شاخص طیفی منبع بر روی طیف فوتون‌ها و الکترون‌های ثانویه تولید شده توسط پرتوهای اولیه آهن و پروتون، در اندرکنش‌های تولید فوتوپایون، واپاشی بتا و تولید زوج، مورد بررسی قرار گرفت. همچنین سهم هریک از اندرکنش‌ها از انرژی کل پرتوهای اولیه با تغییر این کمیت‌ها بررسی شد. مشاهده شد که در اولیه‌های آهن تعداد و میانگین انرژی ذرات ثانویه تولید شده در فوتوپایون، از ثانویه‌های پروتون کمتر است ولی ذرات حاصل از واپاشی بتا و تولید زوج در اولیه‌های آهن بیشتر است. برای هر دو اولیه، با کاهش کمینه انرژی ذرات اولیه، سهم اندرکنش‌های تولید پایون و واپاشی بتا از انرژی کل پرتوهای اولیه کاهش می‌یابد ولی سهم تولید زوج افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش شاخص طیفی، به دلیل کاهش شدید ذرات پرنرژی اولیه طیف ذرات حاصل از تمام اندرکنش‌ها و همچنین سهم انرژی همه آنها از انرژی کل اولیه، کاهش می‌یابد.

کلیدواژگان: پرتوهای کیهانی بغایت پرنرژی، اندرکنش‌های هادرونی، طیف ذرات ثانویه، CRPropa3.0

انرژی، ترکیب جرمی و راستای رسیدن این پرتوها از مهم‌ترین موضوعات مورد بررسی توسط این رصدخانه‌ها هستند [1]. یکی از بارزترین جنبه‌های طیف انرژی پرتوهای کیهانی افت طیف در انرژی‌های حدود $5 \times 10^{19} \text{eV}$ است که توسط رصدخانه Pierre Auger [2] مشاهده شده است. دقیقاً مشخص نیست که علت این افت رخداد پدیده GZK [3] در این محدوده انرژی است یا به دلیل تعداد بسیار کم منابعی است که توانایی شتاب دادن ذرات تا چنین انرژی‌های بالایی را دارند. همچنین این رصدخانه گزارش‌هایی مبنی بر تطابق بین راستای ورود تعدادی

مقدمه

پرتوهای کیهانی بغایت پرنرژی ذرات بارداری هستند که با انرژی‌هایی بالاتر از 10^{18}eV از خارج منظومه شمسی به زمین می‌رسند. اگرچه این پرتوها بیش از هفتاد سال قبل کشف شده‌اند اما منابع، مکانیزم‌های شتابدهی و چگونگی انتشار این پرتوها هنوز هم ناشناخته است و تحقیقات گسترده‌ای در مورد آن انجام می‌شود. در دهه گذشته با توسعه نسل جدیدی از رصدخانه‌های بزرگ مقیاس پرتوهای کیهانی، پیشرفت‌های بسیاری در این رشته رخ داده است. طیف

* نویسنده مسئول: Grastegar@semnan.ac.ir

منابع پرتو کیهانی، کمک کننده باشد. جستجوی فوتون‌های ثانویه از این منظر دارای اهمیت است که این ذرات در میدان‌های مغناطیسی کهکشانی و بین کهکشانی منحرف نمی‌شوند. برخلاف پرتوهای کیهانی که برای ردیابی آنها نیاز به شناخت دقیق میدان مغناطیسی وجود دارد، فوتون‌ها و نوترینوها می‌توانند مستقیماً محل تولید خود را نشان دهند. بنابراین بیشینه اطلاعات را می‌توان با شبیه‌سازی‌های چندگانه انجام داد. برنامه شبیه‌سازی استفاده شده در این مقاله CRPropa3.0 است که در ادامه در مورد آن توضیحاتی می‌دهیم.

مروری بر CRPropa

برای انجام شبیه‌سازی انتشار پرتوهای کیهانی بغایت پرانرژی چندین ابزار شبیه‌سازی با قابلیت دسترسی عمومی وجود دارد. ابزار شبیه‌سازی استفاده شده در این مقاله کُد شبیه‌سازی مونت کارلو با نام CRPropa است. نسخه قبلی این برنامه CRPropa2.0 [8] یک ابزار شبیه‌سازی به‌زیان C^{++} است که برای شبیه‌سازی انتشار پروتون و هسته‌های سنگین‌تر پرتوی کیهانی تا $Z=26$ و انرژی بالاتر از 10^{16} eV، همچنین فوتون‌ها، نوترینوها [9] و الکترون-پوزیترون‌های ثانویه آنها در فضای بین کهکشانی، طراحی شده است. اندرکنش‌های لحاظ شده در این کُد شامل تولید فوتوپایون، شکست فوتونی هسته (photodisintegration) و تولید زوج الکترون در برخورد پرتوهای بغایت پرانرژی با فوتون‌های پس‌زمینه میکروموج کیهانی (CMB) و پس‌زمینه اپتیکی/IR/UV (IRB) می‌باشند. اُفت انرژی آدیاباتیکی به‌علت انبساط کیهان و واپاشی ایزوتوپ‌های پرتوهای کیهانی نیز در این کُد لحاظ شده است. در

پرتوی کیهانی با انرژی بالاتر از 6×10^{18} eV و محل چند هسته فعال کهکشانی در فاصله کمتر از 75 Mpc [4] منتشر کرده است. علاوه بر آن نتایج Pierre Auger نشان می‌دهد که در بالاترین محدوده انرژی، ترکیب جرمی پرتوها به سمت جرم‌های سنگین‌تر پیش می‌رود [5]، در حالی که نتایج آزمایش‌های HiRes و Telescope Array [6,7] در همان محدوده انرژی نشان‌دهنده غلبه پروتون در ترکیب جرمی پرتوهاست. برای حل چنین تناقضاتی، درک دقیق چگونگی انتشار پرتوهای کیهانی از اهمیت بالایی برخوردار است.

پرتوهای کیهانی بغایت پرانرژی در طول مسیر انتشار، در اثر اندرکنش با فوتون‌های پس‌زمینه کیهانی دچار اُفت انرژی شدید شده و نیز در میدان‌های مغناطیسی کیهانی که شناخت کمی از آنها وجود دارد دچار انحراف می‌شوند. این تأثیرات انتشار، باعث می‌شوند که طیف و ترکیب جرمی که ما دریافت می‌کنیم با طیف و ترکیب جرمی اولیه خارج شده از منبع متفاوت باشد. برای شناخت منبع و ماهیت اولیه پرتوها، ضروری است که ردپای انتشار ذرات را به عقب دنبال کنیم تا به منبع برسیم. بنابراین علاوه بر تحلیل نتایج تجربی، مقایسه آنها با سناریوها و مدل‌های مختلف از طریق شبیه‌سازی، نیز ضروری است. پرتوهای کیهانی، در انرژی‌های بالاتر از 10^{19} eV، با تابش پس‌زمینه کیهانی اندرکنش کرده و پایون‌های خنثی و باردار تولید می‌کنند که این پایون‌ها نیز به فوتون‌ها و نوترینوهای بغایت پرانرژی واپاشی می‌کنند. بنابراین یک رابطه بین شار پرتوهای کیهانی بغایت پرانرژی و شار فوتون‌ها و نوترینوهای بغایت پرانرژی تولید شده وجود دارد که می‌تواند به‌طور همزمان مورد تحلیل قرار گیرد. تعقیب این ذرات ثانویه هم می‌تواند در کشف فیزیک بنیادی حاکم بر کیهان و

قابلیت‌های جدیدی نیز دارد. به‌علت تغییر کامل ساختار برنامه نویسی، در ساختار جدید این امکان فراهم شده که هر یک از ویژگی‌های انتشار، از جمله ساختار منبع، نوع میدان مغناطیسی، تأثیرات تحول کیهانی نوع اندرکنش‌ها و ذرات خروجی مورد نظر و ... توسط خود کاربر و در ماژول‌های جداگانه‌ای تعیین شود و بسته به نوع کاربرد هر یک از ماژول‌ها به‌صورت اختیاری در ماژول اصلی (ماژول انتشار) فراخوانی شود. همچنین به‌کارگیری اندرکنش‌ها نیز از چندین لحاظ بهبود یافته است، سطح مقطع تولید پایون در محدوده وسیعتری از انرژی لحاظ شده است و داده‌های سطح مقطع شکست فوتونی هسته که در CRPropa2.0 از TALYS1 [12] به‌دست می‌آید به [13] TALYS1.6 به‌روز رسانی شده است. انتشار ذرات الکترومغناطیسی تولید شده در اندرکنش‌ها به‌صورت جداگانه با استفاده از کُد تخصصی DINT [14] شبیه‌سازی می‌شود که بخشی از CRPropa3.0 است. DINT معادلات انتقال یک بعدی را برای آبشارهای الکترومغناطیسی آغاز شده توسط فوتون یا الکترون، حل می‌کند. اندرکنش فوتون‌های پرنرژی با فوتون‌های پس‌زمینه که در کُد لحاظ شده، شامل تمام اُفت‌های انرژی مربوطه یعنی تولید یک زوج، تولید زوج دوگانه و سه‌گانه، پراکندگی کامپتون معکوس، و تابش سینکروتون می‌شود.

اندرکنش‌های پرتوهای کیهانی بغایت

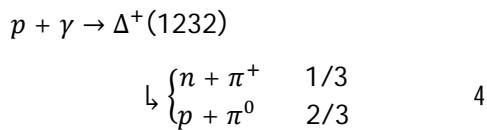
پرانرژی با فوتون‌های پس‌زمینه کیهانی

رایج‌ترین فرآیندهای اندرکنش پرتوهای کیهانی بغایت پرنرژی با فوتون‌های پس‌زمینه، شامل تولید فوتوپایون، شکست فوتونی هسته و تولید زوج هستند. هر یک از این فرآیندها در محدوده‌های مختلفی از

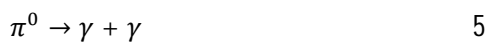
CRPropa2.0 شبیه‌سازی اندرکنش پروتون و هسته‌های سنگین‌تر با فوتون‌های کم انرژی پس‌زمینه توسط برنامه SOPHIA [10] انجام می‌شود. این برنامه که به زبان فرترن است، داده‌های موجود برای سطح مقطع اندرکنش، ترکیب ذرات نهایی، و سینماتیک اندرکنش‌های مختلف که در فیزیک ذرات به‌دست آمده‌اند را استفاده می‌کند و در محدوده وسیعی از انرژی، اندرکنش‌ها را تولید می‌کند.

مقایسه نتایج SOPHIA با نتایج تجربی به‌دست آمده در شتاب‌دهنده‌ها، توافق خوبی را بین شبیه‌سازی با نتایج تجربی نشان می‌دهد. در CRPropa2.0 شبیه‌سازی‌ها می‌تواند در دو حالت یک‌بعدی (1D) و سه بعدی (3D) انجام شود. در حالت یک‌بعدی انحراف ذرات در میدان‌های مغناطیسی بین کلهکشانی در نظر گرفته نمی‌شود و پرتو کیهانی از منبع، که می‌تواند به‌صورت نقطه‌ای یا خطی با توزیع یکنواخت تعریف شده باشد، روی خطی مستقیم به‌سمت ناظر که در مبدأ قرار دارد گسیل می‌شوند. به‌دلیل مشخص بودن زمان حرکت ذره از روی فاصله ناظر تا منبع، امکان در نظر گرفتن تحول کیهانی و انتقال به سرخ منبع در حالت یک‌بعدی وجود دارد. در حالت سه بعدی انحراف هسته‌های باردار در اثر حرکت در میدان مغناطیسی لحاظ می‌شود و منبع می‌تواند به‌صورت نقطه‌ای یا سه بعدی با چگالی یکنواخت یا چگالی شبکه‌ای در نظر گرفته شود. در حالت سه بعدی به‌دلیل انحراف ذرات، نمی‌توان زمان کل حرکت ذره را از روی فاصله بین منبع و ناظر مشخص کرد، بنابراین امکان در نظر گرفتن انتقال به سرخ وجود ندارد. نسخه جدید این برنامه، CRPropa3.0 [11] که به‌زبان پایتون نوشته شده است علاوه بر دارا بودن تمام ویژگی‌های فوق،

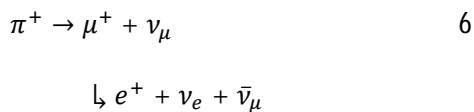
طریق رزونانس دلتا است، این ذره پایونهای باردار و خشی تولید می‌کند:



پایونهای خشی بعد از 8.5×10^{-17} s واپاشی کرده و فوتون تولید می‌کنند:



در حالی که پایونهای باردار بعد از حدود 2.6×10^{-8} s واپاشی کرده و نوترینو تولید می‌کنند:



نوترونهای تولید شده هم از طریق واپاشی بتا، واپاشی می‌کنند:



در بالاترین انرژیهای پرتوهای کیهانی، تولید فوتوپایون مهم‌ترین فرآیند اندرکنش است و منجر به پدیده معروف (GZK) می‌شود که احتمالاً علت افت شار پرتوی کیهانی در انرژی $E_{GZK} = 5 \times 10^{19}$ eV برای پروتون‌هاست. برای هسته‌ها این انرژی آستانه بیشتر است $E_m \approx A \times E_{GZK}$. این اندرکنش پراثرترین فوتون‌ها، الکترون‌ها و نوترینوها را تولید می‌کند.

شبیه‌سازی یک بعدی و ذرات ثانویه

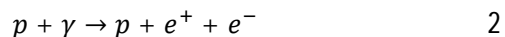
برای بررسی ذرات ثانویه تولید شده در انتشار پرتوهای کیهانی بغایت پراثری، با استفاده از CRPropa3.0، انتشار تعداد 10^4 ذره اولیه آهن و پروتون، که از منابعی با توزیع یکنواخت در فاصله 3 تا

سطح مقطع کل اندرکنش پرتو کیهانی با فوتونهای پس‌زمینه، غالب هستند. نسبت هر اندرکنش، هم به انرژی پرتوکیهانی E، و هم انرژی فوتون پس‌زمینه \mathcal{E} ، بستگی دارد. با استفاده از تبدیل لورنتس، این بستگی را می‌توان به وابستگی انرژی فوتون پس‌زمینه در چارچوب سکون هسته پرتو کیهانی تبدیل کرد:

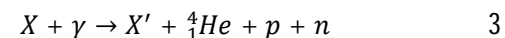
$$\mathcal{E}' = \gamma \mathcal{E} (1 - \beta \cos(\theta)) \quad 1$$

که در آن $\gamma = E/mc^2$ ، $\beta = v/c$ فاکتور لورنتس، و θ زاویه برخورد دو ذره است.

وقتی انرژی فوتون زمینه در چارچوب سکون هسته کمتر از انرژی بستگی نوکلئون‌ها در هسته باشد (در مرتبه انرژی ~ 1 MeV)، فوتونهای پس‌زمینه به‌طور کشسان از هسته پراکنده می‌شوند و در اثر افزایش انرژی به زوج e^+e^- واپاشی می‌کنند، که به این ترتیب پروتون یا هسته دچار افت انرژی می‌شود.



در انرژیهای بالاتر از انرژی بستگی نوکلئون‌ها در هسته ($\mathcal{E}' \geq 8-9$ MeV)، فرآیند برخورد ناکشسان می‌شود و فوتون می‌تواند نوکلئون یا هسته‌های سبک را از داخل هسته به بیرون پرتاب کند، به این فرآیند شکست فوتونی هسته می‌گویند.

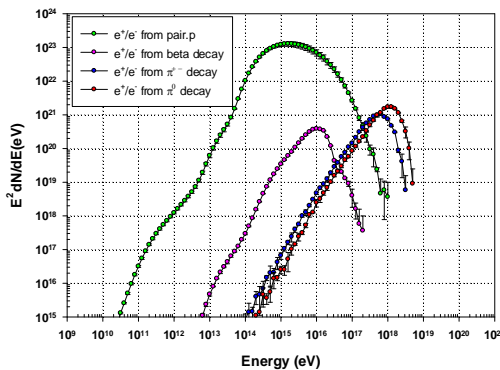


البته این فرآیند در مورد پروتون‌ها که تک نوکلئون هستند رخ نمی‌دهد.

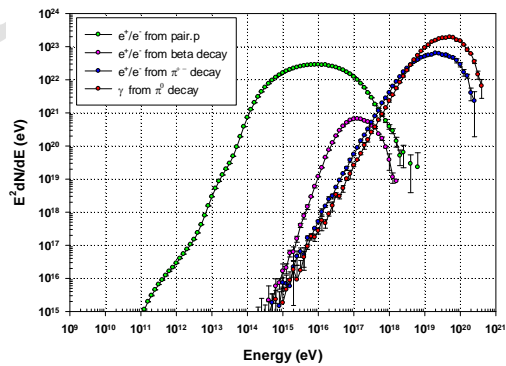
به‌محض اینکه انرژی فوتون زمینه در چارچوب سکون هسته به انرژی آستانه تولید فوتوپایون برسد ($\mathcal{E}' \sim 145$ MeV)، این فرآیند تبدیل به اندرکنش غالب می‌شود. مهم‌ترین نوع این اندرکنش تولید پایون از

شکل 1 طیف فوتونها و الکترون‌های تولید شده در انتشار ذرات اولیه پروتون و آهن را برحسب نوع اندرکنش، نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل 1 دیده می‌شود، در مورد ذرات اولیه پروتون، پرنرزی‌ترین ذرات فوتون‌های تولید شده در واپاشی پاپون‌های خشتی (رابطه 5)، و الکترون‌های تولید شده در واپاشی پاپون‌های باردار (رابطه 6) هستند. همچنین یک گروه دیگر از الکترون‌های پرنرزی هم توسط واپاشی بتای نوترون‌های تولید شده در فوتوپاپون (رابطه 7)، تولید می‌شوند و کم انرژی‌ترین ثانویه‌ها، الکترون پوزیترون‌های حاصل از تولید زوج هستند. در مورد ذرات اولیه آهن، باز هم پرنرزی‌ترین ذرات محصولات واپاشی پاپون‌ها (روابط 5 و 6) هستند و الکترون‌های کم انرژی نیز از تولید زوج (رابطه 2) به وجود می‌آیند.

1000 Mpc منتشر شده‌اند را شبیه‌سازی کرده‌ایم. طیف انرژی انتخاب شده برای انتشار ذرات اولیه از منبع $\alpha = 1$ ، و محدوده انرژی از کمینه انرژی 10^{18} eV تا بیشینه 10^{21} eV است. ما تمام اندرکنش‌های اشاره شده در بالا را لحاظ کرده‌ایم و از مدل‌های موجود در CRPropa0.3 برای فوتون‌های زمینه استفاده کرده‌ایم. شبیه‌سازی‌ها در حالت یک بعدی و برای هر شرایط اولیه و هر ذره ثانویه مورد نظر پنج مرتبه انجام شده و مقادیر میانگین و خطای استاندارد محاسبه شده است. در مقاله حاضر به‌طور خاص فوتون‌ها و الکترون‌های ثانویه مورد بررسی قرار گرفته‌اند و در این کار به طیف نوترینو پرداخته نشده است.

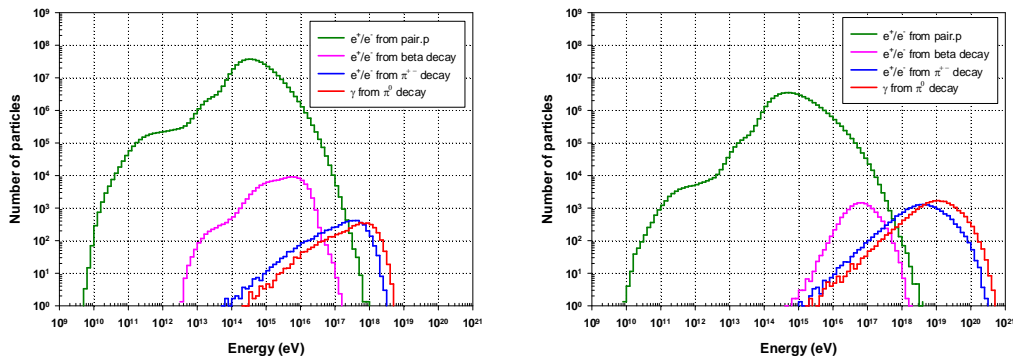


شکل 1. طیف فوتون و الکترون‌های تولید شده توسط ذرات اولیه پروتون (راست) و آهن (چپ) با کمینه انرژی 10^{18} eV که برحسب نوع اندرکنش تفکیک شده‌اند.



الکترون‌های حاصل از فوتوپاپون، و انرژی میانگین آنها، کمتر از ثانویه‌های تولید شده توسط اولیه‌های پروتون است. دلیل این امر کمتر بودن مقدار انرژی به‌ازای هر نوکلئون در اولیه‌های آهن، نسبت به اولیه‌های پروتون می‌باشد.

از سوی دیگر، در شکل 2 که توزیع انرژی تعداد ذرات حاصل از هر اندرکنش را نشان می‌دهد، دیده می‌شود که زوج الکترون‌های کم انرژی‌تر که از طریق تولید زوج (رابطه 2) به وجود آمده‌اند بیشترین تعداد ذرات ثانویه را تشکیل می‌دهند. همچنین در شکل 2 دیده می‌شود که برای اولیه‌های آهن، تعداد فوتون‌ها و



شکل 2. توزیع الکترون و فوتون‌های تولید شده در اندرکنش پرتوهای کیهانی پروتون (راست) و آهن (چپ) با کمینه انرژی 10^{18} eV که برحسب نوع اندرکنش تفکیک شده‌اند.

اندرکنش آهن، تعداد الکترون‌هایی که از واپاشی بتای هسته‌ها و تولید زوج به وجود می‌آیند، از اولیه‌های پروتون بیشتر است، اما متوسط انرژی آنها کمتر است.

در این حالت تعداد کمتری از هسته‌های آهن به انرژی آستانه تولید فوتوپایون می‌رسند. از طرفی به دلیل بالا بودن تعداد هسته‌ها و نوکلئون‌های تولید شده در

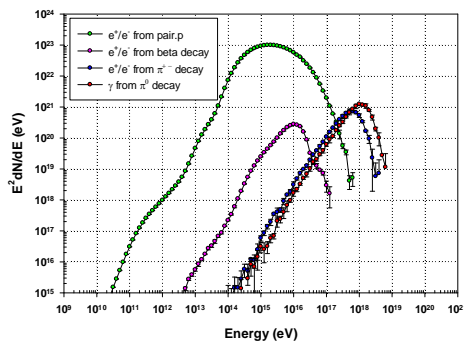
جدول 1. سهم انرژی الکترون‌ها و فوتون‌های ثانویه از انرژی کل ذرات اولیه برحسب درصد که برای مقادیر مختلف انرژی اولیه (برحسب eV) و شاخص طیفی نشان داده شده‌اند.

نوع اندرکنش	طیف	پروتون		آهن			
		$E_0=10^{18}$ $\alpha = 1$	$E_0=5 \times 10^{16}$ $\alpha = 1$	$E_0=10^{18}$ $\alpha = 1/5$	$E_0=10^{18}$ $\alpha = 1$	$E_0=5 \times 10^{16}$ $\alpha = 1$	$E_0=10^{18}$ $\alpha = 1/5$
تولید زوج	e^\pm	8,1814	13,939	6,403	29,456	32,274	26,755
واپاشی بتا	e^\pm	0,0944	0,0752	0,0867	0,047	0,045	0,0354
تولید فوتوپایون	e^\pm	11,695	9,465	9,5115	0,1171	0,1074	0,0679
تولید فوتوپایون	γ	32,239	25,387	25,954	0,1873	0,1773	0,1189

بودن انرژی در واحد نوکلئون نسبت به ذرات اولیه پروتون، درصد کمتری از انرژی کل در تولید فوتوپایون و واپاشی بتا مصرف می‌شود، ولی به دلیل فراوانی بیشتر نوکلئون‌های حاصل از شکست آهن، تولید زوج در اولیه‌های آهن مهم‌ترین فرآیند آفت انرژی است.

برای محاسبه درصد انرژی که ذرات اولیه در اندرکنش‌های مختلف به ثانویه‌ها انتقال می‌دهند، روی طیف ثانویه تمام ذرات، انتگرال انرژی گرفته شده است. جدول 1 درصد انرژی انتقال یافته از کل پرتوهای کیهانی اولیه به هر گروه از ذرات ثانویه تولید شده در هر اندرکنش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در جدول 1 مشاهده می‌شود، برای ذرات اولیه آهن به دلیل کمتر

در مورد هر دو اولیه پروتون و آهن، افزایش محدوده انرژی ذرات باعث کاهش تعداد ذرات اولیه پرنرژی‌تر می‌شود، که کاهش نسبی اندرکنش‌های پرنرژی مانند فوتوپایون و واپاشی بتای نوترون‌های حاصل از آن را منجر می‌شود. با مراجعه به جدول 1 دیده می‌شود که با کاهش انرژی کمینه، سهم اندرکنش‌های فوتوپایون از کل انرژی ذرات آهن و پروتون کاهش یافته است. همچنین علی‌رغم اینکه تعداد الکترون‌های حاصل از تولید زوج نسبت به حالت $E_0=10^{18}\text{eV}$ کاهش یافته است، اما تعداد ذرات اولیه‌ای که انرژی کمتر از 10^{18}eV دارند و در اولین اندرکنش خود زوج الکترون پوزیترون پرنرژی تولید می‌کنند، بیشتر شده است.

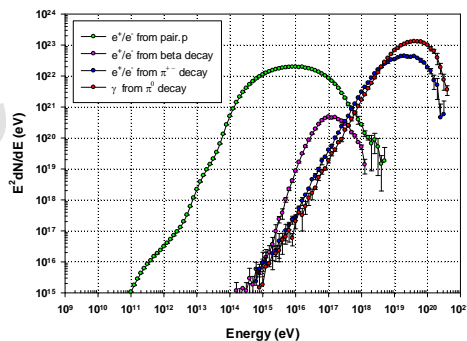


شکل 3. طیف فوتون و الکترون‌های تولید شده برای ذرات اولیه پروتون (راست) و آهن (چپ) با کمینه انرژی $5 \times 10^{16}\text{eV}$ برحسب نوع اندرکنش تفکیک شده‌اند.

پرنرژی را در تمام محدوده انرژی، به صورت یکنواخت منتشر می‌کند. با افزایش شاخص طیفی، ذرات گسیل شده در انرژی‌های بالاتر کاهش می‌یابند و بیشتر ذرات در محدوده پایین انرژی قرار می‌گیرند. برای بررسی این تأثیر ما شبیه‌سازی اولیه را با منابعی با شاخص طیفی $\alpha = 1/5$ تکرار کرده‌ایم. همان‌طور که در شکل 4 دیده می‌شود برای هر دوی ذرات اولیه آهن و پروتون، طیف ذرات ثانویه نسبت به شکل 1 کاهش یافته است که این به علت کاهش ذرات پرنرژی است که در آستانه

تأثیر کمینه انرژی ذرات اولیه بر طیف ذرات ثانویه

برای بررسی تأثیر انرژی ذرات اولیه روی طیف و میزان انرژی ذرات ثانویه، شبیه‌سازی مشابهی با محدوده انرژی $5 \times 10^{16}\text{eV}$ تا 10^{21}eV انجام شد و طیف و سهم انرژی ذرات نیز محاسبه شد. شکل 3، طیف انرژی را برای ذرات اولیه پروتون و آهن، برای کمینه انرژی $5 \times 10^{16}\text{eV}$ نشان می‌دهد. با مقایسه شکل 3 با شکل 1 دیده می‌شود که با کاهش میزان کمینه انرژی، طیف تمام ذرات ثانویه برای هر دوی ذرات اولیه آهن و پروتون کاهش می‌یابد. این امر به دلیل این است که



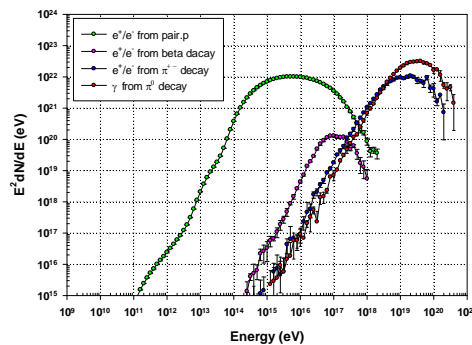
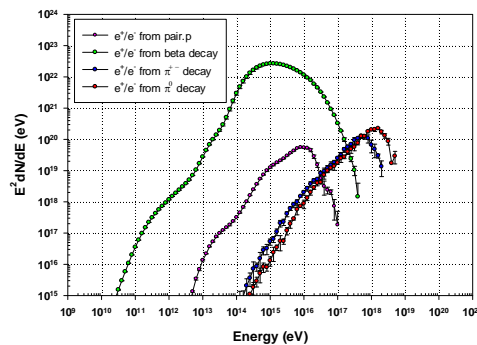
همچنین پروتون‌های ثانویه تولید شده در فوتوپایون (رابطه 5) نیز می‌توانند به طور متوالی تولید زوج کنند در نتیجه سهم تولید زوج از کل انرژی ذرات اولیه افزایش می‌یابد.

تأثیر شاخص طیفی منبع بر طیف ذرات ثانویه

منابعی که ما برای شبیه‌سازی استفاده کرده‌ایم از یک طیف قانون توانی پیروی می‌کنند ($dN/dE \propto E^{-\alpha}$). وقتی $\alpha = 1$ است یعنی منبع پرتوهای کیهانی بغایت

پرانرژی ناشی از افزایش شاخص طیفی، علاوه بر کاهش تعداد ذرات ثانویه، انرژی متوسط آن‌ها را نیز کاهش می‌دهد که باعث می‌شود سهم انرژی تولید زوج هم کاهش یابد.

تولید پایون قرار داشتند. همچنین در جدول 1 مشاهده می‌شود که درصد انرژی انتقال یافته به محصولات فوتوپایون، تولید زوج و همچنین واپاشی بتا به علت کاهش ذرات پرانرژی‌تر که این ثانویه‌ها را تولید می‌کردند کاهش یافته است. این کاهش شدید ذرات



شکل 4. طیف انرژی ذرات ثانویه تولید شده در اندرکنش ذرات اولیه پروتون (راست) و آهن (چپ) با فوتون‌های پس‌زمینه، با شاخص طیفی $\alpha = 1/5$.

پرانرژی‌ترین ذرات، سهم تمامی اندرکنش‌ها از انرژی کل ذرات اولیه، برای هر دو ذره اولیه آهن و پروتون کاهش می‌یابد. بررسی این تفاوت‌های ذرات ثانویه برای ترکیب جرمی اولیه و شرایط انرژی و شاخص طیفی متفاوت، می‌تواند در تفسیر طیف‌های تجربی و همچنین شناخت ماهیت، ترکیب جرمی و ویژگی‌های منابع پرتوهای کیهانی بغایت پرانرژی مورد استفاده قرار بگیرد. بررسی طیف نوترینوهای ثانویه و شبیه‌سازی سه بعدی نیز در حال انجام است و نتایج آن در مقالات آینده منتشر خواهد شد.

مرجع‌ها

[1] ل. رافضی، گ. رستگرازاده، وابستگی فاصله بهینه به هندسه آرایه و مشخصات پرتوهای کیهانی، مجله پژوهش سیستم‌های پس‌ذره‌ای، 7، 13، بهار-تابستان (1396) 77-71.

نتیجه‌گیری

با استفاده از کُد شبیه‌سازی CRPropa0.3، انتشار ذرات پرتوی کیهانی بغایت پرانرژی برای منابعی با ترکیب جرمی اولیه آهن و پروتون بررسی و طیف انرژی فوتون‌ها و الکترون‌های حاصل از اندرکنش هسته‌های اولیه پرتوکیهانی با فوتون‌های پس‌زمینه کیهانی به‌دست آمد. مشاهده شد که در اولیه‌های آهن تعداد و میانگین انرژی ذرات ثانویه تولید شده در فوتوپایون، از ثانویه‌های پروتون کمتر است ولی ذرات حاصل از واپاشی بتا و تولید زوج در اولیه‌های آهن بیشتر است. برای هر دو اولیه، با کاهش کمینه انرژی ذرات اولیه، سهم اندرکنش‌های تولید پایون و واپاشی بتا از انرژی کل پرتوهای اولیه کاهش می‌یابد ولی سهم تولید زوج افزایش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش شاخص طیفی و در نتیجه کاهش تعداد

- public framework for propagating high energy nuclei, secondary gamma rays and neutrinos, *Astroparticle Physics* **42** (2013) 41-51.
- [9] G. Rastegarzadeh, B. Parvizi, M.Sabouhi, Nutrino-hadron spectrum from the propagation of UHE cosmic rays, *European Physics Journal. Plus* **130**, 74 (2015).
- [10] A. Mucke, R. Engel, J.P. Rachen, R.J. Protheroe and T. Stanev, SOPHIA: Monte Carlo simulations of photohadronic processes in astrophysics, *Computer Physics Communication* **124** (2000).
- [11] R.A. Batista, M. Erdmann, C. Evoli, K.H. Kampert, D. Kuempel, G. Müller, G. Sigl, CRPropa3: a public astrophysical simulation framework for propagating Extraterrestrial Ultra-High Energy Particles, *Journal of Physics* **608** (2015) 012076.
- [12] S. Goriely, S. Hilaire, A.J. Koning, Improved predictions of nuclear reaction rates with the TALYS reaction code for astrophysical applications, *Astronomy and Astrophysics* **487** (2008) 767.
- [13] A.J. Koning, S. Hilaire, M. Duijvestijn, TALYS-1.6 user manual, www.talys.eu.
- [14] S. Lee, On the Propagation of Extragalactic High Energy Cosmic and γ -Rays *Physical Review D* **58** (1998) 043004.
- [1] L. Rafezi, G. Rastegarzadeh, Dependence of the optimum distance on array geometry and characteristics of cosmic ray, *Journal of Research on Many-body Systems* **7** 13 (2017) 71-77.
- [2] Pierre Auger Collaboration, J. Abraham et al., Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory, *Physical Letters B* **685** (2010) 239.
- [3] K. Greisen, End to the cosmic ray spectrum? *Physical Review Letters* **16** (1966) 748-750.
- [4] Pierre Auger Collaboration, A. Aabasian et al., Highlights from the Pierre Auger Observatory, *Brazilian Journal of Physics* **44** (2014) 560-570.
- [5] Pierre Auger Collaboration, J. Abraham et al., Measurement of the depth of maximum of extensive air showers above 10^{18} eV, *Physical Review Letters* **104** (2010) 091101.
- [6] C.T. Hill, D.N. Schramm, The ultrahigh-energy cosmic ray spectrum, *Physical Review D* **31** (1985) 564.
- [7] R. Aloisio, V. Berezhinsky, P. Blasi, A. Gazizov, S. Grigorieva et al., A dip in the UHECR spectrum and the transition from galactic to extragalactic cosmic rays, *Astroparticle Physics* **27** (2007) 76-91.
- [8] K.H. Kampert, J. Kulbartz, L. Maccione, N. Nierstenhoefer, P. Schiffer et al., CRPropa 2.0: a

Investigating Ultra-High Energy Cosmic Rays interactions with cosmic background photons using simulation code CRPropa3.0

Gohar Rastegarzadeh*, Hajar Fallahnejad

Department of Physics, Semnan University, Semnan, Iran

Received: 19.12.2017 Final revised: 13.02.2018 Accepted: 04.03.2018

Abstract

In this paper, using simulation code CRPropa3.0, the propagation of 10^4 primary cosmic rays of proton and iron with energy range of 10^{18} to 10^{21} eV was simulated. The spectra of the secondary photons and electron-positrons generated in the interactions of ultra-high energy cosmic rays (UHECRs) with cosmic background photons were investigated. The photon and electron spectra considered here are generated in photopion production, beta decay, and pair production. The minimum energy of primaries and the spectral index of source injection is changed separately and the effect of these changes on the spectra is investigated. Also, the total primary energy percent which transfers to secondaries, is calculated. It is found that for both primaries, lowering the minimum energy of the primaries leads to the decrease of the flux of secondaries. This also results in the decrease of the total energy percent carried by beta and photopion products and the increase of the energy percent of pair production. Finally, it is shown that by increasing the spectral index, the flux and the energy percent of all secondaries decreases for proton and iron primaries.

Keywords: Ultra-high energy cosmic rays, Hadronic interactions, Flux of secondary particles, CRPropa3.0

* Corresponding Author: Grastegar@semnan.ac.i.ir