

بہ نام

آفریدگار

اندیشہ

دانشگاه بین‌المللی امام خمینی



IMAM KHOMEINI
INTERNATIONAL UNIVERSITY

وزارت علوم، تحقیقات و فناوری
دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ره)
دانشکده علوم پایه
گروه فیزیک

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

عنوان:

بررسی ساختار طولی بهمن‌های هوایی گسترده‌ی پرتوهای کیهانی
در ذرات ثانویه‌ی گوناگون

نگارش:

لیلا سید ابراهیم پور

استاد راهنما:

دکتر داود پورمحمد

شهریور ۱۳۹۰

بسمه تعالی


دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)
معاونت آموزشی دانشگاه - مدیریت تحصیلات تکمیلی



تعهد نامه اصالت پایان نامه

اینجانب رشته مقطع تحصیلی بدین وسیله اصالت کلیه مطالب موجود در مباحث مطروحه در پایان نامه / تز تحصیلی خود، با عنوان اعلام می نمایم که تمامی محتوی آن حاصل مطالعه، پژوهش و تدوین خودم بوده و به هیچ وجه رونویسی از پایان نامه و یا هیچ اثر یا منبع دیگری، اعم از داخلی، خارجی و یا بین المللی، نبوده و تعهد می نمایم در صورت اثبات عدم اصالت آن و یا احراز عدم صحت مفاد و یا لوازم این تعهد نامه در هر مرحله از مراحل منتهی به فارغ التحصیلی و یا پس از آن و یا تحصیل در مقاطع دیگر و یا اشتغال و ... دانشگاه حق دارد ضمن رد پایان نامه نسبت به لغو و ابطال مدرک تحصیلی مربوطه اقدام نماید. مضافاً اینکه کلیه مسئولیت ها و پیامدهای قانونی و یا خسارت وارده از هر حیث متوجه اینجانب می باشد.

نام و نام خانوادگی دانشجو
امضاء و تاریخ

۹۰.۷.۲۳ 



دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)

معاونت آموزشی - مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره ۳۰

فرم تأییدیه هیأت داوران جلسه دفاع از پایان نامه / رساله

بدین وسیله گواهی میشود جلسه دفاعیه از پایان نامه کارشناسی ارشد / دکتری
 دانشجوی رشته گرایش تحت عنوان
 در تاریخ ۱۳۹۰/۶/۱۳ در دانشگاه برگزار گردید و این پایان نامه با نمره و درجه مورد تأیید هیأت
 داوران قرار گرفت.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتب‌ی دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	داور پورمحمد	استاد	دانشگاه بین المللی امام خمینی	
۲	استاد مشاور				
۳	داور خارج	کومرنگام رازان	استادیار	دانشگاه سمنان	
۴	داور داخل	هاشم حلیچیان	استادیار	دانشگاه بین المللی امام خمینی	
۵	نماینده تحصیلات تکمیلی	سید سعید میرزایی	دانشیار	" "	

تقدیم به:

پروردگارم،

که با پرتو الهام بخش دانش، پیوسته هدایتگر بندگان خویش از تاریکی جهل به سمت روشنایی آگاهی بوده است.

پدرم،

که عشق بی‌شرفتی علمی فرزندانش، همواره بحضات سخت زندگی را برایش آسان می‌نمود، روحش شاد...

مادرم،

که یک تنه تمام سختی‌ها را به بهای اعتلای علمی فرزندانش تحمل می‌نمود.

همسرم،

که همواره مشوق و یاریگر من در راه رسیدن به آنچه می‌خواستم بوده است.

دخترم،

که خود را بخاطر تمام خطائی که توانستم در کنارش باشم مدیون می‌دانم.

چکیده

بررسی ساختار طولی ذرات ثانویه در بهمن‌های هوایی گسترده، تفاوت‌های ناشی از ذرات و انرژی-های اولیه‌ی مختلف را روشن می‌کند. در این پروژه، نخست با بکارگیری مدل برهم‌کنش هادرونی QGSJET در کد شبیه‌سازی کورسیکا، تعداد ۳۹۰۰ بهمن هوایی گسترده ناشی از پنج نوع ذره‌ی اولیه فوتون، پروتون، هلیوم، آلومینیوم و آهن در هشت گام انرژی از 10^{14} eV تا 10^{21} eV (برای فوتون تا 10^{20} eV) شبیه‌سازی شدند. در گام بعد، برنامه‌ای نوشته شد تا برای هر یک از انواع ذرات ثانویه، تعداد بیشینه (N_{max}) و عمق بیشینه (X_{max}) و میانگین این پارامترها، میان هر ۱۰۰ بهمن با شرایط اولیه یکسان بدست آیند. سپس، به بررسی وابستگی میانگین N_{max} و X_{max} برای ذرات ثانویه e^+e^- ، $\mu^+\mu^-$ و فوتون، به انرژی (E_0) و عدد جرمی (M) ذرات اولیه پرداخته شد. از برازش نمودارهای میانگین $\log N_{max}$ و X_{max} برحسب $\log E_0$ و نمودارهای میانگین N_{max} و X_{max} بر حسب M به مناسب‌ترین منحنی‌ها، برای هر یک از ذرات ثانویه نامبرده، روابط خطی میان N_{max} و E_0 و همچنین X_{max} و $\log E_0$ و روابط توانی بین N_{max} و X_{max} با M بدست آمد. در پایان، چگونگی تأثیر تغییرات انرژی اولیه و نوع ذره اولیه و ثانویه بر ضرایب موجود در روابط نامبرده بررسی شد. در گام بعدی، پس از بررسی مقدار بیشینه نسبت باریونی، N_{μ^+}/N_{μ^-} ، و عمق متناظر آن و افت‌وخیز این نسبت در ده بهمن تصادفی ناشی از آلومینیوم با انرژی اولیه 10^{14} eV، با رسم نمودارهای میانگین نسبت باریونی بر حسب عمق جو به بررسی افت‌وخیز میانگین این نسبت در عمق‌های مختلف جو در بهمن‌های ناشی از فوتون، پروتون و آهن و با انرژی اولیه 10^{14} eV، 10^{16} eV و 10^{20} eV پرداخته شد. در نهایت، مقادیر قابل قبولی برای نسبت باریونی بدست آمد.

سپاس گزارمی

سپاس از پرودگار مهربانم که یاد و نام او همواره آرامش بخش من در هر دم از زندگی ام بوده است.

از آقای دکتر داود پورمحمد که در پیشرفت زمانی پروژه نقش بسزایی داشتند و راهنمایی های ایشان پیوسته گره کشای مشکلات پیش آمده در این پروژه بوده است، صمیمانه سپاس گزارم.

از همسرم که سختی های این دوره را با بردباری تحمل کرده و در این مسیر همواره یاریگر من بودند سپاس ویژه دارم.

از دختر کوچکم زینب، ستوده، بخاطر تمام محنات تنهایی که در نبود من با شکیبایی سپری کرد و با قلب مهربان خود این حق را بر من بخشید سپاس ویژه دارم.

در پایان، از تمام کسانی که به نحوی در انجام این پروژه به من یاری رساندند کمال سپاس را دارم.

فهرست مطالب

۱۲	۱ . پرتوهای کیهانی.....
۱۲	۱.۱ مقدمه.....
۱۲	۲.۱ ویژگی های پرتوهای کیهانی.....
۱۲	۱.۲.۱ نوع پرتوهای کیهانی.....
۱۳	۲.۲.۱ فراوانی های نسبی عناصر در پرتوهای کیهانی.....
۱۵	۳.۲.۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی.....
۱۶	۳.۱ پرتوهای کیهانی با انرژی بسیار بالا (UHECRs).....
۱۸	۴.۱ منشأ پرتوهای کیهانی.....
۱۹	۱.۴.۱ محتمل ترین چشمه های پرتوهای کیهانی.....
۲۰	۵.۱ برهم کنش های پرتوهای کیهانی در جو.....
۲۱	۱.۵.۱ اتلاف انرژی از طریق یونیزاسیون.....
۲۵	۲.۵.۱ پراکندگی کولنی.....
۲۶	۳.۵.۱ گسیل تابش چرنکوف.....
۲۷	۴.۵.۱ پراکندگی کامپتون.....
۲۹	۵.۵.۱ تابش ترمزی.....
۳۲	۶.۵.۱ تولید زوج.....
۳۴	۷.۵.۱ اتلاف انرژی نهایی ذرات.....
۳۶	۲ . بهمن های هوایی گسترده و راه های آشکارسازی پرتوهای کیهانی.....
۳۶	۱.۲ مقدمه.....

۳۷	۲.۲ بهمن‌های هوایی گسترده.....
۳۷	۱.۲.۲ ویژگی‌های بهمن‌های هوایی گسترده
۳۸	۲.۲.۲ انواع بهمن‌های هوایی گسترده
۳۹	۱.۲.۲.۲ بهمن‌های الکترومغناطیسی
۴۱	۲.۲.۲.۲ بهمن‌های هادرونی
۴۲	۳.۲.۲ گسترش بهمن‌های هوایی گسترده.....
۴۲	۱.۳.۲.۲ گسترش طولی
۴۵	۲.۳.۲.۲ گسترش عرضی
۴۶	۳.۲ راه‌های آشکارسازی پرتوهای کیهانی
۴۷	۱.۳.۲ آرایه‌های آشکارساز ذرات
۴۸	۲.۳.۲ آشکارسازهای چرنکوف
۴۹	۳.۳.۲ آشکارسازهای فلورسانس
۵۲	۳ . شبیه‌سازی بهمن‌های هوایی گسترده.....
۵۲	۱.۳ مقدمه
۵۲	۲.۳ کد شبیه‌سازی کورسیکا
۵۴	۳.۳ مدل‌های برهم‌کنش‌های هادرونی
۵۴	۱.۳.۳ مدل‌های برهم‌کنش در انرژی‌های بالا
۵۵	۲.۳.۳ مدل‌های برهم‌کنش در انرژی‌های پایین
۵۶	۳.۳.۳ مدل‌های برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی
۵۷	۴.۳ چگونگی شبیه‌سازی با برنامه‌ی کورسیکا
۵۷	۱.۴.۳ اطلاعات ورودی

۶۴	۲.۴.۳ اطلاعات خروجی
۷۵	۴. بررسی رابطه‌ی بین پارامترهای بهمن با نوع و انرژی ذره‌ی اولیه
۷۵	۱.۴ مقدمه
۷۶	۲.۴ شبیه‌سازی بهمن‌های هوایی گسترده و انجام محاسبات
۷۹	۳.۴ بررسی وابستگی N_{max} و X_{max} به انرژی ذره‌ی اولیه
۷۹	۱.۳.۴ وابستگی N_{max} به انرژی ذره‌ی اولیه
۸۱	۱.۱.۳.۴ برازش داده‌ها و بدست آوردن رابطه‌ی بین N_{max} و انرژی ذره‌ی اولیه
۸۳	۲.۳.۴ وابستگی X_{max} به انرژی ذره‌ی اولیه
۸۵	۱.۲.۳.۴ برازش داده‌ها و بدست آوردن رابطه‌ی بین X_{max} و انرژی ذره‌ی اولیه
۸۹	۴.۴ وابستگی N_{max} و X_{max} به نوع ذره‌ی اولیه (عدد جرمی)
۹۱	۱.۴.۴ وابستگی N_{max} به عدد جرمی ذره‌ی اولیه
۹۲	۱.۱.۴.۴ برازش داده‌ها و بدست آوردن رابطه‌ی بین N_{max} و عدد جرمی ذره‌ی اولیه
۹۷	۲.۴.۴ وابستگی X_{max} به عدد جرمی ذره‌ی اولیه
۹۸	۱.۲.۴.۴ برازش داده‌ها و بدست آوردن رابطه‌ی بین X_{max} و عدد جرمی ذره‌ی اولیه
۱۰۳	۵.۴ بررسی افت و خیز نسبت $N_{\mu} + / N_{\mu} -$ در عمق‌های مختلف جو
۱۱۵	۵. جمع‌بندی و پیشنهادات
۱۱۵	۱.۵ نتیجه‌گیری
۱۱۶	۲.۵ پیشنهادات

فهرست جدول‌ها

جدول ۱-۱: پارامترهای مربوط به اتلاف انرژی از طریق یونیزاسیون در مواد مختلف [19]	۲۴
جدول ۲-۱: طول تابش و انرژی بحرانی مربوط به چند عنصر معمول [19]	۳۱
جدول ۳-۱: انرژی بحرانی در چند ماده [21]	۳۲
جدول ۱-۳: کد ذرات مورد استفاده در برنامه‌ی شبیه‌سازی کورسیکا (ادامه دارد)	۵۹
جدول ۲-۳: زمان انجام محاسبات و تعداد ذرات برای حدود مختلف thinning بدون تعیین وزن مشخص	۶۳
جدول ۳-۳: واحدهای مورد استفاده در کورسیکا	۶۴
جدول ۴-۳: ساختار بلوک فایل خروجی ذرات و فوتون‌های چرنکوف	۶۶
جدول ۵-۳: ساختار زیربلوک Run Header	۶۷
جدول ۶-۳: ساختار زیربلوک Event Header (ادامه دارد)	۶۸
جدول ۷-۳: ساختار زیربلوک Particle data	۷۰
جدول ۸-۳: ساختار زیربلوک Cherenkov photon data	۷۰
جدول ۹-۳: ساختار زیربلوک Longitudinal	۷۱
جدول ۱۰-۳: ساختار زیربلوک Event End	۷۲
جدول ۱۱-۳: ساختار زیربلوک Run end	۷۳
جدول ۱-۴: میانگین تعداد و عمق بیشینه برای e^+e^- در بهمن‌های شبیه‌سازی شده با کورسیکا (ادامه دارد)	۷۷
جدول ۲-۴: ضرایب برازش به منحنی $\log N_{\max} = a + b \log E_0$ برای ذرات ثانویه گوناگون در بهمن‌های شروع شونده با ذرات اولیه مختلف	۸۲
جدول ۳-۴: ضرایب برازش به منحنی $X_{\max} = a' + b' \log E_0$ برای ذرات ثانویه گوناگون در بهمن‌های شروع شونده با ذرات اولیه مختلف	۸۵
جدول ۴-۴: ضرایب برازش به منحنی $N_{\max} = aM^b$ برای ذرات ثانویه گوناگون در بهمن‌های شروع شونده با انرژی‌های اولیه مختلف	۹۳
جدول ۵-۴: ضرایب برازش به منحنی $X_{\max} = a'M^{b'}$ برای ذرات ثانویه گوناگون در بهمن‌های شروع شونده با انرژی‌های اولیه مختلف	۹۹
جدول ۶-۴: مقادیر بیشینه‌ی نسبت بار میونی و عمق متناظر آن به همراه تعداد میون‌های مثبت و منفی در بیشینه در ۱۰ بهمن تصادفی شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV	۱۰۹

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: مقایسه‌ی فراوانی عناصر مختلف موجود در منظومه‌ی شمسی (آبی) و پرتوهای کیهانی (سیاه)..... ۱۴
- شکل ۲-۱: طیف انرژی پرتوهای کیهانی..... ۱۵
- شکل ۳-۱: طیف انرژی پرتوهای کیهانی در حوالی آستانه‌ی GZK و اختلاف بین مشاهدات پایگاه‌های مختلف..... ۱۷
- شکل ۴-۱: برهم‌کنش‌های پرتوهای کیهانی در حین گسترش در جو [20]..... ۲۱
- شکل ۵-۱: اتلاف انرژی یونیزاسیون به عنوان تابعی از انرژی برای ذرات مختلف [21]..... ۲۳
- شکل ۶-۱: مقایسه‌ی اتلاف انرژی یونیزاسیون با در نظر گرفتن تصحیحات پوششی و چگالی و بدون آن برای مس [21]..... ۲۴
- شکل ۷-۱: تابش چرنکوف، یک موج شوک الکترومغناطیسی، تولید شده توسط ذره‌ای به سرعت v در محیطی به ضریب شکست n [21]..... ۲۶
- شکل ۸-۱: پراکندگی کامپتون [21]..... ۲۷
- شکل ۹-۱: $F(E,k)$ بدست آمده از رابطه‌ی ۲۱.۱ (خط پیوسته) و رابطه‌ی ۲۲.۱ (خط چین) برای الکترونی با انرژی 100 MeV [19]..... ۳۰
- شکل ۱۰-۱: $G(E,k)$ بدست آمده از رابطه‌ی ۲۹.۱ (خط پیوسته) و رابطه‌ی ۳۰.۱ (خط چین) برای فوتونی با انرژی 100 MeV [19]..... ۳۴
- شکل ۱۱-۱: اتلاف انرژی از طریق یونیزاسیون و تابش ترمزی برای میون در گذر از یک سنگ استاندارد [20]..... ۳۴
- شکل ۱-۲: طرح واره‌ای از گسترش یک بهمین در جو [20]..... ۳۶
- شکل ۲-۲: محور و جبهه‌ی بهمین و زاویه‌ی سروسویی پرتوی اولیه [22]..... ۳۸
- شکل ۳-۲: تفاوت پراکندگی بهمین الکترومغناطیسی (چپ) با بهمین پروتونی (راست)..... ۳۹
- شکل ۴-۲: مدل ساده‌ی هایتلر برای گسترش بهمین الکترومغناطیسی..... ۴۰
- شکل ۵-۲: شکل ساده‌ای برای گسترش یک بهمین با ذره اولیه‌ی پروتون در جو [22]..... ۴۲
- شکل ۶-۲: وابستگی عمق به تعداد الکترون‌ها برای یک بهمین الکترومغناطیسی در انرژی‌های مختلف بدست آمده از رابطه‌ی ۴.۲ [19]..... ۴۴
- شکل ۷-۲: مقایسه‌ی 10 بهمین پروتونی عمودی مختلف در انرژی 10°GeV با میانگین بهمین‌ها [19]..... ۴۵
- شکل ۸-۲: نحوه‌ی برخورد یک بهمین با آرایه‌ای از آشکارسازهای ذرات [10]..... ۴۸
- شکل ۹-۲: نحوه‌ی آشکارسازی نور فلئورسان تابش شده توسط تلسکوپی با دهانه‌ای به گشودگی θ ۵۰
- شکل ۱۰-۲: ساختار آینه‌ها و فوتومالتی‌پلایرها در آزمایش چشم مگس..... ۵۱
- شکل ۱-۳: نمونه‌ی فایل ورودی برنامه‌ی شبیه‌سازی کورسیکا..... ۵۹

- شکل ۳-۲: دستگاه مختصات در برنامه‌ی کورسیکا. ۶۲
- شکل ۳-۳: بخش‌هایی از دو جدول ثبت شده در فایل خروجی با پسوند long. ۷۵
- شکل ۴-۱: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای e^+e^- در بهمن شروع شونده با پروتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۸۰
- شکل ۴-۲: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای $\mu^+\mu^-$ در بهمن شروع شونده با پروتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۸۱
- شکل ۴-۳: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با پروتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۸۱
- شکل ۴-۴: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای e^+e^- در بهمن شروع شونده با پروتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۸۳
- شکل ۴-۵: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای $\mu^+\mu^-$ در بهمن شروع شونده با پروتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۸۴
- شکل ۴-۶: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با پروتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۸۴
- شکل ۴-۷: نمودار نقطه‌ای ضریب a' بر حسب عدد جرمی ذره اولیه برای ذره ثانویه e^+e^- ۸۶
- شکل ۴-۸: نمودار نقطه‌ای ضریب a' بر حسب عدد جرمی ذره اولیه برای ذره ثانویه میون. ۸۷
- شکل ۴-۹: نمودار نقطه‌ای ضریب a' بر حسب عدد جرمی ذره اولیه برای ذره ثانویه فوتون. ۸۷
- شکل ۴-۱۰: نمودار نقطه‌ای ضریب b' بر حسب عدد جرمی ذره اولیه برای ذره ثانویه e^+e^- ۸۸
- شکل ۴-۱۱: نمودار نقطه‌ای ضریب b' بر حسب عدد جرمی ذره اولیه برای ذره ثانویه میون. ۸۸
- شکل ۴-۱۲: نمودار نقطه‌ای ضریب b' بر حسب عدد جرمی ذره اولیه برای ذره ثانویه فوتون. ۸۹
- شکل ۴-۱۳: نمودار N_{\max} برحسب عدد جرمی، M ، در انرژی 10^{20} eV برای ذره ثانویه میون با در نظر گرفتن فوتون به عنوان ذره اولیه. ۸۹
- شکل ۴-۱۴: نمودار X_{\max} برحسب عدد جرمی، M ، در انرژی 10^{20} eV برای ذره ثانویه میون با در نظر گرفتن فوتون به عنوان ذره اولیه. ۹۰
- شکل ۴-۱۵: نمودار N_{\max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{16} eV برای e^+e^- به همراه منحنی برازش یافته. ۹۱
- شکل ۴-۱۶: نمودار N_{\max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{16} eV برای $\mu^+\mu^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۹۲
- شکل ۴-۱۷: نمودار N_{\max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{16} eV برای فوتون به همراه منحنی برازش یافته. ۹۲
- شکل ۴-۱۸: نمودار نقطه‌ای $\log a$ برحسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه e^+e^- ۹۴
- شکل ۴-۱۹: نمودار نقطه‌ای $\log a$ برحسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه میون. ۹۵

- شکل ۴-۲۰: نمودار نقطه‌ای $\log a$ بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه فوتون. ۹۵.....
- شکل ۴-۲۱: نمودار نقطه‌ای ضریب b بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه $e^+ + e^-$. ۹۶.....
- شکل ۴-۲۲: نمودار نقطه‌ای ضریب b بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه میون. ۹۶.....
- شکل ۴-۲۳: نمودار نقطه‌ای ضریب b بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه فوتون. ۹۷.....
- شکل ۴-۲۴: نمودار X_{\max} بر حسب عدد جرمی در انرژی 10^{16} eV برای $e^+ + e^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۹۷.....
- شکل ۴-۲۵: نمودار X_{\max} بر حسب عدد جرمی در انرژی 10^{16} eV برای $\mu^+ + \mu^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۹۸.....
- شکل ۴-۲۶: نمودار X_{\max} بر حسب عدد جرمی در انرژی 10^{16} eV برای فوتون به همراه منحنی برازش یافته. ۹۸.....
- شکل ۴-۲۷: نمودار نقطه‌ای ضریب a' بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه $e^+ + e^-$. ۱۰۰.....
- شکل ۴-۲۸: نمودار نقطه‌ای ضریب a' بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه میون. ۱۰۱.....
- شکل ۴-۲۹: نمودار نقطه‌ای ضریب a' بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه فوتون. ۱۰۱.....
- شکل ۴-۳۰: نمودار نقطه‌ای ضریب b' بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه $e^+ + e^-$. ۱۰۲.....
- شکل ۴-۳۱: نمودار نقطه‌ای ضریب b' بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه میون. ۱۰۲.....
- شکل ۴-۳۲: نمودار نقطه‌ای ضریب b' بر حسب $\log E_0$ برای ذره ثانویه فوتون. ۱۰۳.....
- شکل ۴-۳۳: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۴.....
- شکل ۴-۳۴: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۴.....
- شکل ۴-۳۵: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۵.....
- شکل ۴-۳۶: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۵.....
- شکل ۴-۳۷: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۶.....
- شکل ۴-۳۸: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۶.....
- شکل ۴-۳۹: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۷.....
- شکل ۴-۴۰: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV . ۱۰۷.....

- شکل ۴-۱: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV ۱۰۸
- شکل ۴-۲: نمودار $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای یک بهمن شروع شونده با آلومینیوم در انرژی 10^{14} eV ۱۰۹
- شکل ۴-۳: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با پروتون در انرژی 10^{14} eV ۱۱۰
- شکل ۴-۴: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با پروتون در انرژی 10^{16} eV ۱۱۰
- شکل ۴-۵: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با پروتون در انرژی 10^{20} eV ۱۱۱
- شکل ۴-۶: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با آهن در انرژی 10^{14} eV ۱۱۱
- شکل ۴-۷: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با آهن در انرژی 10^{16} eV ۱۱۲
- شکل ۴-۸: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با آهن در انرژی 10^{20} eV ۱۱۲
- شکل ۴-۹: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با فوتون در انرژی 10^{14} eV ۱۱۳
- شکل ۴-۱۰: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با فوتون در انرژی 10^{16} eV ۱۱۳
- شکل ۴-۱۱: نمودار میانگین $N\mu + /N\mu -$ بر حسب عمق جو برای بهمن شروع شونده با فوتون در انرژی 10^{20} eV ۱۱۴
- شکل پ-۱: نمودار $\log(N_{\max})$ بر حسب $\log(E_0)$ برای $e^+ + e^-$ در بهمن شروع شونده با فوتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۱۲۰
- شکل پ-۲: نمودار $\log(N_{\max})$ بر حسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با فوتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۱۲۰
- شکل پ-۳: نمودار $\log(N_{\max})$ بر حسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با فوتون، به همراه منحنی برازش یافته. ۱۲۱
- شکل پ-۴: نمودار $\log(N_{\max})$ بر حسب $\log(E_0)$ برای $e^+ + e^-$ در بهمن شروع شونده با هلیوم،

- ۱۲۱ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۵: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با هلیوم،
- ۱۲۲ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۶: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با هلیوم،
- ۱۲۲ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۷: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای e^+e^- در بهمن شروع شونده با آلومینیوم،
- ۱۲۳ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۸: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با آلومینیوم،
- ۱۲۳ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۹: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با آلومینیوم،
- ۱۲۴ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۰: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای e^+e^- در بهمن شروع شونده با آهن،
- ۱۲۴ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۱: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با آهن،
- ۱۲۵ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۲: نمودار $\log(N_{\max})$ برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با آهن،
- ۱۲۵ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۳: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای e^+e^- در بهمن شروع شونده با فوتون،
- ۱۲۶ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۴: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با فوتون،
- ۱۲۷ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۵: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با فوتون،
- ۱۲۷ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۶: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای e^+e^- در بهمن شروع شونده با هلیوم،
- ۱۲۸ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۷: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با هلیوم،
- ۱۲۸ به همراه منحنی برازش یافته. شکل پ-۱۸: نمودار X_{\max} برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با هلیوم،
- ۱۲۹ به همراه منحنی برازش یافته.

- شکل پ-۱۹: نمودار X_{max} برحسب $\log(E_0)$ برای $e^+ + e^-$ در بهمن شروع شونده با آلومینیوم،
 به همراه منحنی برازش یافته. ۱۲۹
- شکل پ-۲۰: نمودار X_{max} برحسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با آلومینیوم،
 به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۰
- شکل پ-۲۱: نمودار X_{max} برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با آلومینیوم،
 به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۰
- شکل پ-۲۲: نمودار X_{max} برحسب $\log(E_0)$ برای $e^+ + e^-$ در بهمن شروع شونده با آهن،
 به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۱
- شکل پ-۲۳: نمودار X_{max} برحسب $\log(E_0)$ برای میون در بهمن شروع شونده با آهن،
 به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۱
- شکل پ-۲۴: نمودار X_{max} برحسب $\log(E_0)$ برای فوتون در بهمن شروع شونده با آهن،
 به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۲
- شکل پ-۲۵: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{14} eV برای $e^+ + e^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۲
- شکل پ-۲۶: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{14} eV برای میون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۳
- شکل پ-۲۷: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{14} eV برای فوتون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۳
- شکل پ-۲۸: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{15} eV برای $e^+ + e^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۴
- شکل پ-۲۹: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{15} eV برای میون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۴
- شکل پ-۳۰: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{15} eV برای فوتون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۵
- شکل پ-۳۱: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{17} eV برای $e^+ + e^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۵
- شکل پ-۳۲: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{17} eV برای میون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۶
- شکل پ-۳۳: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{17} eV برای فوتون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۶
- شکل پ-۳۴: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{18} eV برای $e^+ + e^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۷
- شکل پ-۳۵: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{18} eV برای میون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۷
- شکل پ-۳۶: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{18} eV برای فوتون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۸
- شکل پ-۳۷: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{19} eV برای $e^+ + e^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۸
- شکل پ-۳۸: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{19} eV برای میون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۹
- شکل پ-۳۹: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{19} eV برای فوتون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۳۹
- شکل پ-۴۰: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{20} eV برای $e^+ + e^-$ به همراه منحنی برازش یافته. ۱۴۰
- شکل پ-۴۱: نمودار N_{max} برحسب عدد جرمی در انرژی 10^{20} eV برای میون به همراه منحنی برازش یافته. ۱۴۱

۱. پرتوهای کیهانی

۱.۱ مقدمه

در اوایل قرن بیستم دانشمندان در پی حل معمای عجیبی بودند. این معما چیزی نبود به جز آشکارسازی تابش‌های رادیواکتیو که از مقدار مورد انتظار ناشی از منابع شناخته شده تا آن زمان بیش‌تر بود. تابش رادیواکتیو به ذراتی گفته می‌شد که در اثر تبدیل بعضی عناصر سنگین ناپایدار به عناصر سبک‌تر، از عنصر مادر گسیل می‌شدند. الکتروسکوپ در دهه‌ی اول قرن بیستم تنها ابزار استاندارد برای بدست آوردن شدت تابش رادیواکتیو بود و تخلیه‌ی آن بدون قرارگرفتن در معرض ماده‌ی رادیواکتیو، سرچشمه‌ی پیدایش این معما شد. تابشی که باعث تخلیه‌ی آرام الکتروسکوپ می‌شد تابش زمینه^۱ نام گرفت. سرانجام این معما در سال ۱۹۱۲ توسط یک دانشمند آلمانی به نام ویکتور هس^۲ حل شد. هس در پرواز با بالن با استفاده از یک الکتروسکوپ با ورقه‌های طلا تا ارتفاع ۵۳۵۰ متر از سطح دریا به بررسی آهنگ شدت تابش‌ها پرداخت. او دریافت که میزان تابش تا ارتفاع ۲۰۰۰ متر با افزایش ارتفاع کاهش یافته و پس از آن افزایش می‌یابد و در نتیجه این تابش باید منشأ کیهانی داشته باشد. او این تابش را تابش کیهانی نامید که بعدها پرتوهای کیهانی نامیده شد و به این ترتیب گامی جدید به سوی کشف پرتوهای کیهانی برداشته شد. ویکتور هس با این کشف مهم جایزه‌ی نوبل سال ۱۹۳۶ را از آن خود کرد [1,2].

از آن پس تلاش دانشمندان در جهت یافتن نوع، انرژی و منشأ پرتوهای کیهانی بوده است و این تلاش همچنان ادامه دارد.

۲.۱ ویژگی‌های پرتوهای کیهانی

۱.۲.۱ نوع پرتوهای کیهانی

بعد از سال‌ها تحقیق، ماهیت پرتوهای کیهانی هنوز کاملاً مشخص نشده است. در محدوده‌ی انرژی 10^{12} eV تا 10^{10} eV، پرتوهای کیهانی که به لبه‌ی جو زمین برخورد می‌کنند شامل حدود ۵۰٪ پروتون، حدود ۲۵٪ ذرات آلفا، حدود ۱۳٪ هسته‌های C/N/O، حدود ۱۳٪ هسته‌ی آهن، Fe، کم‌تر

¹ Background radiation

² Victor Hess

از ۱٪ الکترون و کمتر از ۰/۱٪ تابش گاما می‌باشند [2,3]. ترکیب پرتوهای کیهانی در انرژی‌های بالاتر هنوز شناخته شده نیست و حتی طیف انرژی نیز در این محدوده با تردید بدست می‌آید. علت اصلی کندی پیشرفت در این محدوده این است که پرتوهای کیهانی با انرژی‌های بالاتر از 10^{10} eV تنها از طریق تحلیل بهمن‌های هوایی گسترده‌ی ناشی از این پرتوها قابل بررسی هستند. انرژی و نوع پرتوی اولیه تنها از طریق تحلیل شکل و ذرات تشکیل دهنده‌ی بهمن‌ها حدس زده می‌شوند. این امر متأسفانه به استفاده از مدل‌های بهمن‌های هوایی که مبتنی بر دانش‌های ناکامل ما از برهم‌کنش‌های هادرونی و الکترومغناطیسی ذرات و فرایندهای واپاشی و چگونگی گسترش آنها در انرژی‌های بالا در جو می‌باشد نیاز دارد. بنابراین بدیهی است که نتایج بدست آمده در انرژی‌های بالا وابسته به مدل است و بدست آوردن نتایج قطعی امکان پذیر نیست [4-6].

آخرین نتایج بدست آمده‌ی حاصل از تحلیل مشاهدات رصدخانه‌ی پیر اوژ^۱ که بر پرتوهای کیهانی با انرژی بسیار بالا ($E > 10^{18}$ eV) متمرکز است، بر وجود یک توزیع یکنواخت از هسته‌های سنگین یا با جرم متوسط در محدوده‌ی نیتروژن، N، تا سیلیکون، Si، در انرژی‌های بالاتر از eV $10^{18.5}$ دلالت دارد و در انرژی‌های پایین‌تر ($E \sim 10^{18}$ eV) هسته‌های سبک‌تر یا پروتون را عمده ترکیب جرمی برای پرتوهای کیهانی می‌داند. در حالیکه تحلیل نتایج پایگاه‌های دیگر از جمله یاکوتسک^۲ ترکیب جرمی متفاوتی را پیش‌بینی می‌کند [6].

۲.۲.۱ فراوانی‌های نسبی عناصر در پرتوهای کیهانی

شکل ۱-۱ فراوانی عناصر مختلف موجود در منظومه‌ی شمسی^۳ (SS) و پرتوهای کیهانی کهکشان^۴ (GCR) را مقایسه می‌کند. نمی‌توان گفت که این فراوانی‌ها با چه دقتی درست هستند ولی از مقایسه‌ی آنها می‌توان نتایج زیر را گرفت:

۱. شباهت فراوانی‌ها و وجود عناصر مشترک در پرتوهای کیهانی و منظومه‌ی شمسی گواه این است که ترکیب جرمی چشمه‌ی پرتوهای کیهانی که از مرتبه‌ی 10^7 سال پیش شتاب گرفته‌اند بسیار شبیه به سحابی^۵ است که در حدود 4.6×10^9 سال پیش منظومه‌ی شمسی را شکل داده است.

۲. فراوانی عناصری مانند کربن، C، اکسیژن، O، نئون، Ne، منیزیم، Mg، سیلیکون، Si، آهن، Fe و نیکل، Ni، در پرتوهای کیهانی به خوبی با فراوانی در منظومه‌ی شمسی مطابقت دارد.

¹ Pierre Auger

² Yakutsk

³ Solar System

⁴ Galactic Cosmic Rays

⁵ Nebula