

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه شهید باهنر کرمان

دانشکده فیزیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک

گرایش فیزیک نجومی

---

---

شبه‌سازی کورسیکا در پرتوهای کیهانی با انرژی بالا

---

---

استاد راهنما:

دکتر سید جلیل‌الدین فاطمی

استاد مشاور:

دکتر پانته آ داوودی‌فر

مؤلف:

محسن جلال‌آبادی

بهمن ماه ۱۳۹۱



دانشگاه شهید باهنر کرمان

این پایان نامه به عنوان یکی از شرایط درجه کارشناسی ارشد به

بخش فیزیک

دانشکده علوم

دانشگاه شهید باهنر کرمان

تسلیم شده است و هیچگونه مدرکی به عنوان فراغت از تحصیل دوره مزبور شناخته نمی شود.

دانشجو: محسن جلال آبادی راوری

استاد راهنما: دکتر سیدجلیل الدین فاطمی

استاد مشاور: خانم دکتر پانته آ داوودی فر

داور ۱: خانم دکتر فریده شجاعی

داور ۲: دکتر حمید ارجمند کرمانی

نماینده ی تحصیلات تکمیلی: دکتر حسین جلال کمالی

معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشکده: خانم دکتر فریده شجاعی

حق چاپ محفوظ و مربوط به دانشگاه شهید باهنر کرمان است.

## چکیده

یکی از منابع شناخت کیهان مطالعه‌ی پرتوهای کیهانی می‌باشد. پرتوهای کیهانی پرنرژی با ورود به جو بهمن‌های گسترده‌ی هوایی را بوجود می‌آورند. با آشکارسازی ذرات ثانویه‌ی بهمن‌ها بوسیله‌ی آرایه‌های زمینی و شبیه‌سازی مونت کارلوی این ذرات می‌توان پی به ویژگیهای پرتوهای کیهانی مولد بهمن در فضا برد. کامل‌ترین نرم‌افزار شبیه‌سازی مونت کارلو در این رابطه نرم‌افزار کورسیکا می‌باشد که بوسیله‌ی گروه کاسکید تهیه شده و در جاهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرد. شاخص طیفی شار پرتوهای کیهانی در چند ناحیه دارای تغییراتی می‌باشد. یکی از این نواحی محدوده‌ی زانوی اول در حدود انرژی  $5 \times 10^{15}$  الکترون‌ولت می‌باشد. که در این پایان‌نامه شبیه‌سازی‌هایی برای سه ترکیب جرمی آهن، پروتون و گاما در این ناحیه انجام شده است.

## کلید واژه‌ها:

۱- پرتوهای کیهانی ۲- شبیه‌سازی بهمن‌های گسترده‌ی هوایی ۳- کورسیکا ۴- زانوی اول

## فهرست

د	چکیده
ب	فهرست
ز	فهرست جدول ها
ز	فهرست شکل ها
۱	پیشگفتار
۴	فصل اول: پرتوهای کیهانی
۵	۱-۱ تاریخچه کشف پرتوهای کیهانی
۸	۲-۱ ترکیبات جرمی پرتوهای کیهانی
۱۱	۳-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی
۱۳	۴-۱ بهمن های گسترده ی هوایی
۱۶	۵-۱ آشکارسازی پرتوهای کیهانی
۲۰	فصل دوم: فیزیک به کار رفته در کورسیکا
۲۱	۱-۲ فلسفه پیدایش
۲۴	۲-۲ کنترل و اجرای برنامه
۲۵	۳-۲ دستگاه مختصات در کورسیکا
۲۷	۴-۲ میدان مغناطیسی زمین
۲۷	۵-۲ ذرات
۲۸	۶-۲ انرژی اتلافی در اثر یونیزاسیون
۳۰	۱-۶-۲ پراکندگی چندگانه کولن
۳۰	۲-۶-۲ تئوری پراکندگی مولر
۳۲	۷-۲ برهم کنش های الکترومغناطیسی
۳۲	۱-۷-۲ برهم کنش های مئونی
۳۴	۲-۷-۲ مؤلفه های الکترومغناطیسی بهمن
۳۴	۳-۷-۲ روال تولید آبخار الکترون - گاما (۴)
۳۴	۴-۷-۲ تولید فوتون از مئون ها و هادرون ها
۳۷	۵-۷-۲ اصلاحات اساسی کد استاندارد آبخار الکترون - گاما (۴)

۳۹	گزینه ان کا جی
۳۹	گسترش طولی بهمن های الکترومغناطیسی
۴۰	پارامتر عمر طولی
۴۱	توزیع عرضی الکترون
۴۲	تابش چرنکوف
۴۴	دیدگاه
۴۵	<b>فصل سوم: برنامه شبیه سازی کورسیکا CORSIKA</b>
۴۶	۱-۳ مقدمه
۴۶	۲-۳ نصب کورسیکا
۵۳	۳-۳ شرح شبیه سازی ها
۵۶	۴-۳ نمودارهای تعداد الکترون ها بر حسب انرژی برای سه پرتو مختلف
۵۹	۵-۳ نمودارهای تعداد مئون ها بر حسب انرژی برای سه پرتو مختلف
۶۲	۶-۳ تعداد الکترون ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره ی متفاوت
۶۴	۷-۳ تعداد مئون ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره ی متفاوت
۶۶	۸-۳ مطالعه ی نسبت تعداد مئون به الکترون برای پرتوهای اولیه ی مختلف
۶۹	۹-۳ مطالعه ی ترکیبات جرمی در اطراف ناحیه ی زانو در طیف انرژی پرتوهای کیهانی
۷۲	<b>نتیجه گیری</b>
۷۳	<b>مرجع ها</b>

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱: فراوانی نسبی عناصر در منظومه شمسی و پرتوهای کیهانی ..... ۱۰
- جدول ۱-۲: ارتباط عمق جوی با ارتفاع برای چند نقطه‌ی نمونه ..... ۲۶
- جدول ۲-۲: سطح مقطع برهم‌کنش فوتون-نوکلئون برای پروتون ..... ۳۵
- جدول ۳-۲: نسبت انشعاب تعاملات فوتون-نوکلئون که منجر به تولید دو پایون می‌شوند ..... ۳۷
- جدول ۴-۲: ضرایب مورد نیاز برای محاسبه‌ی پارامتر عمر طولی جهانی (SLONG) ..... ۴۱

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: مشاهدات یونیزاسیون هوا توسط ویکتور هس ..... ۷
- شکل ۲-۱: فراوانی نسبی شیمیایی پرتوهای کیهانی ..... ۸
- شکل ۳-۱: شار ثبت شده برای پرتوهای کیهانی ..... ۱۲
- شکل ۴-۱: طیف انرژی پرتوهای کیهانی ..... ۱۳
- شکل ۵-۱: نموداری شماتیک از یک بهمن هوایی ..... ۱۴
- شکل ۶-۱: کسر انرژی آزاد شده و تعداد ذرات به عنوان تابعی از عمق جوی ..... ۱۶
- شکل ۷-۱: نمای شماتیکی از آرایه‌ی کاسکید ..... ۱۷
- شکل ۸-۱: تصویری شماتیک از نحوه‌ی برخورد بهمن به آرایه ..... ۱۸
- شکل ۹-۱: زمان‌های ورود ذرات، مانیتور شده از یک رخداد در آزمایشگاه کاسکید ..... ۱۹
- شکل ۱۰-۱: انرژی‌های ذرات، مانیتور شده از یک رخداد در آزمایشگاه کاسکید ..... ۱۹
- شکل ۱-۲: دستگاه مختصات در کورسیکا ..... ۲۵
- شکل ۲-۲: ارتباط عمق جوی با ارتفاع و زاویه‌ی سمت الرأسی ..... ۲۶
- شکل ۳-۲: انرژی اتلافی ذره در هوا به صورت تابعی از فاکتور لورنتز ..... ۲۹
- شکل ۴-۲: سطح مقطع تولید فوتون برای پروتون به صورت تابعی از انرژی ..... ۳۵
- شکل ۱-۳: اطلاعات تعداد ذرات مشاهده شده از یک بهمن شبیه‌سازی شده ..... ۵۰
- شکل ۲-۳: اطلاعات میانگین از بیست بهمن شبیه‌سازی شده ..... ۵۱
- شکل ۳-۳: نمونه‌ای از تصویر گرافیکی ساخته شده از بهمن شبیه‌سازی شده ..... ۵۲
- شکل ۴-۳: تعداد الکترون‌ها بر حسب انرژی از سه ذره‌ی اولیه در ارتفاع پنج کیلومتری ..... ۵۶
- شکل ۵-۳: تعداد الکترون‌ها بر حسب انرژی از سه ذره‌ی اولیه در ارتفاع دو کیلومتری ..... ۵۷
- شکل ۶-۳: تعداد الکترون‌ها بر حسب انرژی از سه ذره‌ی اولیه در ارتفاع صد و دو متری ..... ۵۸
- شکل ۷-۳: تعداد الکترون‌ها بر حسب انرژی از سه ذره‌ی اولیه در سطح دریا ..... ۵۸

- شکل ۳-۸: مقایسه‌ی تعداد مئون‌ها بر حسب انرژی در ارتفاع پنج کیلومتری..... ۵۹
- شکل ۳-۹: مقایسه‌ی تعداد مئون‌ها بر حسب انرژی در ارتفاع دو کیلومتری..... ۶۰
- شکل ۳-۱۰: مقایسه‌ی تعداد مئون‌ها بر حسب انرژی در ارتفاع صد و دو متری..... ۶۱
- شکل ۳-۱۱: مقایسه‌ی تعداد مئون‌ها بر حسب انرژی در سطح دریا..... ۶۱
- شکل ۳-۱۲: تعداد الکترون‌ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره‌ی اولیه با انرژی  $10^{15}$  eV..... ۶۲
- شکل ۳-۱۳: تعداد الکترون‌ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره‌ی اولیه با انرژی  $5 \times 10^{15}$  eV..... ۶۳
- شکل ۳-۱۴: تعداد الکترون‌ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره‌ی اولیه با انرژی  $10^{16}$  eV..... ۶۳
- شکل ۳-۱۵: تعداد مئون‌ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره‌ی اولیه با انرژی  $10^{15}$  eV..... ۶۴
- شکل ۳-۱۶: تعداد مئون‌ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره‌ی اولیه با انرژی  $5 \times 10^{15}$  eV..... ۶۵
- شکل ۳-۱۷: تعداد مئون‌ها بر حسب ارتفاع برای سه ذره‌ی اولیه با انرژی  $10^{16}$  eV..... ۶۵
- شکل ۳-۱۸: نسبت تعداد مئون به الکترون بر حسب انرژی در ارتفاع پنج کیلومتری..... ۶۶
- شکل ۳-۱۹: نسبت تعداد مئون به الکترون بر حسب انرژی در ارتفاع دو کیلومتری..... ۶۷
- شکل ۳-۲۰: نسبت تعداد مئون به الکترون بر حسب انرژی در ارتفاع صد و دو متری..... ۶۸
- شکل ۳-۲۱: نسبت تعداد مئون به الکترون بر حسب انرژی در سطح دریا..... ۶۹
- شکل ۳-۲۲: طیف انرژی پرتوهای کیهانی اولیه بازسازی شده‌ی کاسکید..... ۷۰



# پیشگفتار

امروزه شبیه‌سازی در تار و پود علوم رسوخ کرده و در این راستا نرم‌افزارهای شبیه‌سازی بسیاری با کاربردهای گوناگون ارائه شده است. شبیه‌سازی امکان مطالعه و بررسی سیستم را با صرف حداقل زمان و هزینه، فراهم می‌کند و به همین جهت بعنوان ابزاری توانمند در بسیاری از رشته‌های علوم، مهندسی، علوم فضایی، پزشکی، زیست‌شناسی، داروسازی، اقتصاد و مدیریت ... کاربردهای فراوانی پیدا کرده است. در یک تعریف کلی شاید بتوان گفت شبیه‌سازی تقلیدی از عملکرد سیستم واقعی با گذشت زمان است و یا شبیه‌سازی عبارت است از نمایش جنبه‌هایی از یک پدیده یا سیستم توسط ارقام، اعداد و اشکال به نحوی که بتوان بدان وسیله آن پدیده یا جنبه‌های مورد نظر را به سهولت مورد مطالعه و بررسی قرار داد.

در مورد سیستم‌های پیچیده‌تر روش‌های شبیه‌سازی مناسب‌تر است. در این روش از یک الگو یا مدلی از سیستم که شامل اطلاعات لازم برای بررسی و تجزیه و تحلیل آن باشد استفاده می‌کنند. یک مدل، ترکیب مناسبی از خصوصیات سیستم و اطلاعات لازم مربوط به آن می‌باشد. مسلماً هرچه جزئیات بیشتری از سیستم در مدل گنجانده شود شباهت زیادتری به سیستم واقعی پیدا نموده و رفتار آنرا بهتر نمایش خواهد داد. از طرف دیگر وجود جزئیات بیشتر در مدل سبب مشکل‌تر شدن مطالعه آن می‌گردد.

در علم نجوم بویژه شاخه پرتوهای کیهانی نیز بدلیل گسترده بودن عرصه عمل و پرهزینه بودن طراحی آزمایشگاه‌ها، آشکارسازها و ... شبیه‌سازی نفوذ زیادی نموده است و کدهای محاسباتی و نرم‌افزارهای متنوعی بدین منظور طراحی گردیده است یا از کدهایی که برای شاخه‌های دیگر علم فیزیک طراحی شده نیز در زمینه پرتوهای کیهانی و مطالعه‌ی بهم‌ن‌های گسترده‌ی هوایی استفاده می‌شود که اکثر قریب به اتفاق این کدها بر مبنای الگوریتم‌هایی مبتنی بر اعداد تصادفی (الگوریتم‌های مونت کارلو) مانند فلوکا<sup>۱</sup>، جیسا<sup>۲</sup>، جیانت<sup>۳</sup> و ... طراحی شده‌اند.

یکی از کامل‌ترین نرم‌افزارهای طراحی شده بدین منظور نرم‌افزار کورسیکا<sup>۴</sup> می‌باشد. این نرم‌افزار در واقع مکمل اکثر کدهایی که تا کنون در زمینه پرتوهای کیهانی برای شبیه‌سازی بهم‌ن‌های گسترده‌ی هوایی، آبشارها، خوشه‌های الکترونی و ... مشاهده شده در آشکارسازها طراحی شده، می‌باشد.

---

1 FLUKA

2 GHEISHA

3 GIANT

4 CORSIKA (Cosmic Rays Simulation for KAscad)

در این پایان‌نامه که بر مبنای طراحی و شبیه‌سازی بهمن‌های گسترده هوایی بوسیله نرم‌افزار کورسیکا نوشته شده است سعی شده که بخشی از طیف انرژی پرتوهای کیهانی در اطراف زانوی اول این طیف یعنی محدوده‌ی  $10^{15}$  تا  $10^{16}$  الکترون‌ولت (یک تا ده PeV) بوسیله‌ی این آزمایشگاه مجازی مورد مطالعه قرار گیرد و بدین وسیله بتوان تفاوت ترکیبات جرمی پرتوهای اولیه و انرژی ذرات اولیه‌ای که به جو برخورد کرده‌اند بررسی کرد. چرا که در یک تعبیر عامل بوجود آورنده‌ی زانو را در تغییر ترکیبات جرمی در قبل و بعد از این محدوده از طیف پرتوهای کیهانی می‌دانند.

در فصل اول مختصراً به علم پرتوهای کیهانی شامل تاریخچه کشف، ترکیبات جرمی پرتوها، طیف انرژی، بهمن‌های گسترده هوایی و آشکارسازی بهمن‌ها اشاره شده است. در فصل دوم مختصراً با فیزیک بکار رفته در کورسیکا و مدل‌های برهم‌کنش به کاررفته در آن برای انرژی‌های پایین و انرژی‌های بالا آشنا می‌شویم.

فصل سوم به آشنایی مختصری با نحوه‌ی نصب و راه‌اندازی و استفاده‌ی از نرم‌افزار کورسیکا چگونگی مبادله‌ی ورودی و خروجی و تعامل با این نرم‌افزار اختصاص داده شده است. و همچنین شرح شبیه‌سازی‌های انجام شده می‌باشد که همانطور که گفته شد شبیه‌سازی‌هایی در محدوده‌ی انرژی  $10^{15}$  تا  $10^{16}$  الکترون‌ولت (انرژی ذره‌ی اولیه) برای سه ذره‌ی آهن، پروتون و گاما برای هر کدام ده انرژی و برای یک زاویه‌ی سمت‌الرأسی، جمعاً سی شبیه‌سازی و در هر شبیه‌سازی بیست بهمن تولید شده و نتایج آشکارسازی در چهار سطح مشاهده ثبت گردیده است. که ما سعی کرده‌ایم بین داده‌های حاصل از شبیه‌سازی‌هایمان همبستگی‌هایی پیدا کرده و نتایج را در جداول و نمودارهایی به تصویر بکشیم.

## فصل اول:

### پرتوهای کیهانی

## ۱-۱ تاریخچه کشف پرتوهای کیهانی

جو زمین همواره در معرض تابش طیف گسترده ای از پرتوها با شارهای متفاوتی می‌باشد که بخش کوچکی از آن شامل پرتوهای پرانرژی می‌باشند که از منابع مختلفی (و بعضا ناشناخته‌ای) از فضا منتشر شده‌اند و خود منبعی برای شناخت کیهان برای انسان شده‌اند. این پرتوهای شامل ذرات زیراتمی مانند پروتون، هسته عناصر والکترون هستند که عمدتاً به طور معمول حالت پایداری را دارند، و بخش کوچکی از این پرتوها شامل ذرات و پاد ذرات مانند پوزیترون، آنتی پروتون و غیره می‌باشند و حتی پرتوهای گاما نیز تشکیل دهنده پرتوهای کیهانی می‌باشد که این حوزه مورد تحقیق می‌باشد. به هر حال پرتوهای کیهانی هر چه باشند ممکن است در برخوردشان با جو ذرات ثانویه‌ای را در حین نفوذشان به جو در سطح زمین حتی بعضاً در عمق زمین تولید کنند.

تاریخچه پرتوهای کیهانی با اکتشاف گازهای باردار در مخازن بسته در اوایل قرن ۲۰ شروع شد. دو گروه کانادایی مک‌لینان<sup>۱</sup> و بورتوم<sup>۲</sup> و از دانشگاه تورنتو [۱] و رادرفورد<sup>۳</sup> و کوک<sup>۴</sup> از دانشگاه مک‌گیل<sup>۵</sup> [۲] در سال ۱۹۰۳ متوجه شدند که میزان بار الکتریکی از یک الکتروسکوپ در داخل یک محفظه فلزی بی‌منفذ که توسط یک محافظ فلزی به ضخامت چندین سانتی‌متر احاطه شده می‌تواند به اندازه ۳۰٪ کاهش یابد. از دست دادن بار الکتروسکوپ محصور شده به علت بعضی از تابش‌های بسیار با نفوذ بود. در ابتدا تصور می‌کردند که این پرتوها باید به مواد رادیواکتیو موجود در زمین یا در هوا مربوط باشد.

با نفوذترین پرتو شناخته شده در آن زمان پرتو گاما بود که ضریب میرایی خوبی در هوا داشت. زمانی که پرتو گامایی از میان ماده عبور می‌کند، شدت آن به طور نمایی کاهش می‌یابد. چنین کاهش نمایی همچنین باید هنگامی که یونیزاسیون هوا اندازه گیری می‌شود مشاهده شود.

در طی سال‌های بعد کشف شد که تابش‌ها با افزایش ارتفاع آنطور که انتظار می‌رفت کاهش پیدا نمی‌کنند. اولین گزارش در مورد این نکته توسط فیزیکدانی بنام تئودور ولف<sup>۶</sup> ارائه

---

1 McLennan  
2 Burtom  
3 Rutherford  
4 Cooke  
5 McGill  
6 Teodor Wolf

شد. اندازه گیری‌ها ابتدا در لیم-پیت<sup>۱</sup> در شهر والکنبورگ<sup>۲</sup> و سپس در بالای برج ایفل انجام شد، که بزرگترین سازه دست بشر در آن روزها بود. بعداً این آزمایش را گوکل<sup>۳</sup> فیزیکدان سوئسی با یک الکتروسکوپ در ارتفاعات بوسیه‌ی بالون انجام داد.

ویکتور هس<sup>۴</sup> فیزیکدان اتریشی که در مؤسسه فیزیکی وین در زمینه رادیو اکتیو کار می‌کرد، بر این باور بود که منابع یونیزاسیون در آسمان است و نه در پوسته زمین. او ۱۰ پرواز را با بالون با وسایل اندازه گیری فشار و حرارتی ثابت و پایدار انجام داد (۲ پرواز در سال ۱۹۱۱ و ۷ پرواز در سال ۱۹۱۲ و یک پرواز در سال ۱۹۱۳ که ۵ پرواز از آنها در طول شب بود). در طول ۶ پرواز اول او موفق نشد به ارتفاع مورد نیاز از سطح زمین برسد. قبل از پرواز هفتم، او یک کیسه را با هیدروژن (به جای گاز زغال سنگ) پر کرد و با بالون که نام آن را بوهمن<sup>۵</sup> گذاشته بود تا ارتفاع ۵ کیلومتری از سطح زمین بالا رفت (بدون استفاده از ماسک). بدین ترتیب بالون پرواز خود را در ۷ آگوست سال ۱۹۱۲ از شهری در شمال جمهوری چک فعلی با ویکتور هس، خلبان هافوری<sup>۶</sup> و هواشناس ولف<sup>۷</sup> شروع کرد. هس متوجه شد که اگرچه در ابتدا تا ارتفاع حدود ۶۱۰ متری میزان دشارژ شدن‌های الکتروسکوپ کاهش پیدا می‌کند، پس از آن روند افزایشی دشارژ شدن آغاز می‌شود و به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد، در ارتفاع حدود ۴۸۰۰ متری از سطح دریا تا ۴ مرتبه دشارژ شدن افزایش داشت (شکل ۱-۱). او به این نتیجه رسید، که تابش با قدرت نفوذ بالا از فضای بالای اتمسفر وارد آن می‌شود [۳].

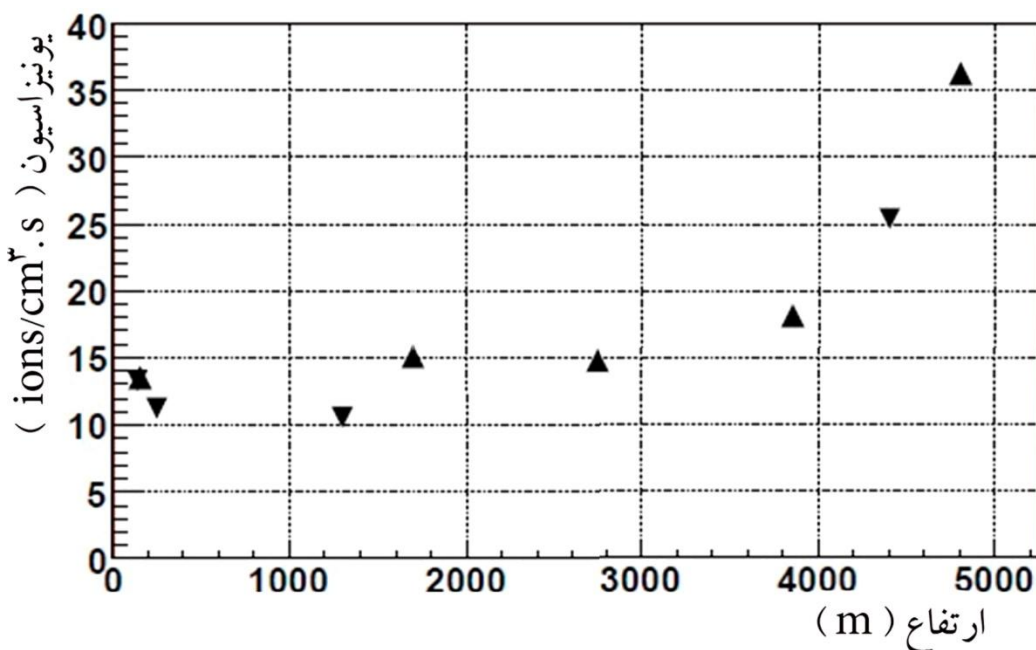
" با استفاده از نتایج بدست آمده از مشاهدات موجود به نظر می‌رسد به سادگی با فرض اینکه تابشی با قدرت نفوذ بسیار زیادی از بالا به اتمسفر ما وارد می‌شود، می‌توان یونیزاسیون مشاهده شده در مخازن بسته را در لایه‌های پایین تر توجیه نمود."

بعد از اینکه ۵ پرواز با بالون در طی شب و یکی هم در خلال یک خورشید گرفتگی تقریباً کامل در ۱۲ آوریل سال ۱۹۱۲ انجام شد و هیچ تغییری در میزان دشارژ شدن مشاهده نشد هس به این نتیجه رسید که خورشید نمی‌تواند به خودی خود منبع اصلی این جریان باشد. نتایج

---

1 lime-pit  
2 Valkenburg  
3 Gockel  
4 Viktor Franz Hess  
5 Böhmen  
6 W. Hoffory  
7 E. Wolf

هس توسط گلهرستر<sup>۱</sup> فیزیکدان آلمانی تأیید شد. او افزایش یونیزاسیون را تا ارتفاع ۹ کیلو متری اندازه گیری کرد. اینها شواهدی بود که نشان می داد منابع تابش یون ساز باید در بالاتر از سطح زمین واقع شده باشند. فرضیه های هس درباره این مطلب که تابش ها از فضای خارج وارد اتمسفر زمین می شوند (در آن زمانی که این مطلب را ارائه کرده بود) به طور کلی پذیرفته نشد. همچنان احتمالات دیگری نیز مدنظر بود. اما پس از جنگ جهانی اول تحقیقات بهبود پیدا کرد و از فرضیه هس حمایت شد. در قرن بیستم فیزیکدان آمریکایی رابرت میلیکان<sup>۲</sup> مطالعات بیشتری را بوسیله پرتاب بالون های بدون سرنشین انجام داد. او گزارش کرد که هیچ افزایشی در سطح پرتوها ندیده است. یافته های او درست بود، بعدها معلوم شد که میزان پرتوهای کیهانی در مناطق مورد مطالعه او به طور غیر منتظره ای پایین بوده است. نهایتاً، در سال ۱۹۲۵، میلیکان آزمایش های دیگری را با الکتروسکوپ ها در اعماق دریاچه ها انجام داد [۴]. با انجام این آزمایشات، میلیکان به این نتیجه رسید که این پرتوها از بالا می آیند (از فضای خارج)، بنابراین او آنها را تابش فوق العاده<sup>۳</sup> نامید.

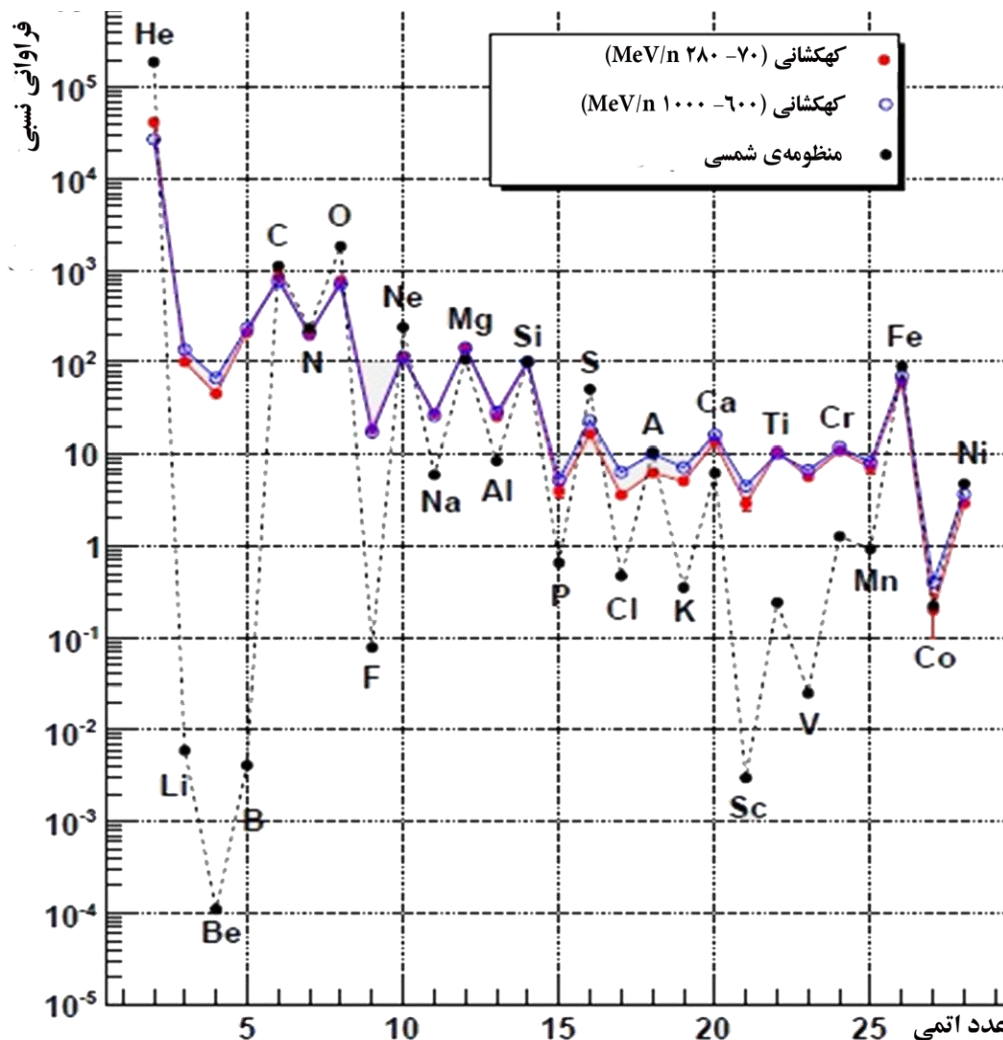


شکل ۱-۱: مشاهدات یونیزاسیون هوا که توسط هس در سال ۱۹۱۲ اندازه گیری شده است. مثلث های بالا / پایین صعود و نزول بالون Böhmen است. [۵]

1 Werner Kolhörster  
 2 Robert Millikan  
 3 Ultra strahlung

## ۲-۱ ترکیبات جرمی پرتوهای کیهانی

برای تعیین انواع ذرات یا هسته‌هایی که توسط یک آشکارساز پرتو کیهانی مشاهده شده، درک فرآیندهای اخترفیزیکی که آنها را تولید کرده مهم است. ترکیب پرتوهای کیهانی شامل اکثر عناصر موجود در جدول تناوبی می‌شود. در شکل ۲-۱ و جدول ۱-۱ فراوانی نسبی عناصر در منظومه شمسی و پرتوهای کیهانی تولید شده در کهکشان را نشان می‌دهد. فراوانی‌های به کار رفته در نمودار و جدول مذکور نسبت به عنصر منگنز در عناصر منظومه‌ی شمسی می‌باشد.



شکل ۲-۱: فراوانی نسبی شیمیایی پرتوهای کیهانی اندازه‌گیری شده در زمین در مقایسه با فراوانی‌های منظومه شمسی و کهکشانی (نسبت به فراوانی عنصر منگنز) [۸].



منظومه‌ی شمسی	پرتوهای کیهانی	عدد اتمی	عنصر	
270000	26000	1	L	H
18728	3600	2		He
$4.2 \times 10^{-04}$	18	3		Li
$6.9 \times 10^{-06}$	10.50	4		Be
$3.0 \times 10^{-03}$	28	5		B
100	100	6	M	C
32	25	7		N
182	91	8		O
$2.1 \times 10^{-02}$	$1.7 \times 10^{+00}$	9		F
29	16	10	H	Ne
$5.1 \times 10^{-01}$	2.70	11		Na
8.99	19	12		Mg
$7.2 \times 10^{-01}$	2.80	13		Al
8.47	14	14		Si
$8.1 \times 10^{-02}$	$6.0 \times 10^{-01}$	15		P
4.24	3.00	16		S
$4.8 \times 10^{-02}$	$5.0 \times 10^{-01}$	17		Cl
9.9	$1.5 \times 10^{+00}$	18		A
$3.6 \times 10^{-02}$	$8.0 \times 10^{-01}$	19		K
$6.1 \times 10^{-01}$	2.20	20	Ca	
$3.0 \times 10^{-04}$	$4.0 \times 10^{-01}$	21	VH	Sc
$2.4 \times 10^{-02}$	$1.7 \times 10^{+00}$	22		Ti
$2.2 \times 10^{-03}$	$7.0 \times 10^{-01}$	23		V
$1.1 \times 10^{-01}$	$1.5 \times 10^{+00}$	24		Cr
$9.7 \times 10^{-01}$	1	25		Mn
7.03	10.80	26		Fe
$1.9 \times 10^{-02}$	< 0.2	27		Co
$4.1 \times 10^{-01}$	$4.0 \times 10^{-01}$	28		Ni
$4.6 \times 10^{-03}$		29		Cu
$1.1 \times 10^{-02}$		30		Zn
$2.1 \times 10^{-03}$	$5.0 \times 10^{-04}$	31-35	VVH	
$9.4 \times 10^{-04}$	$5.0 \times 10^{-05}$	36-40		
$3.0 \times 10^{-04}$	$5.0 \times 10^{-05}$	41-60		
$4.7 \times 10^{-05}$	$2.0 \times 10^{-05}$	61-80		
$4.0 \times 10^{-05}$	$1.0 \times 10^{-05}$	> 80		

جدول ۱-۱: فراوانی عناصر در منظومه شمسی و پرتوهای کیهانی (نسبت به فراوانی عنصر منگنز) [۸]

فراوانی نسبی پرتوهای کیهانی بسیار شبیه میانگین فراوانی مواد ستاره‌ای موجود در کهکشان است. در توزیع عناصر موجود در منظومه شمسی، آنجا فراوانی زیاد هسته‌های سبک مانند لیتیوم، برلیوم و بور و فراوانی کم هیدروژن و هلیوم در مقایسه با فراوانی‌های کهکشانی

است (شکل ۱-۲). یک راه برای درک ترکیبات پرتوهای کیهانی این است که فرض کنیم فراوانی نسبی آنها با متوسط ترکیبات کهکشانی مطابقت دارد و اینکه هسته‌های سنگین تر هنگامی که از میان فضای بین ستاره‌ای عبور می‌کنند به هسته‌های سبکتری فروپاشی می‌کنند. فراوانی ایزوتوپی و عنصری پرتوهای کیهانی برای درک مدل‌های سنتز هسته‌ای ستارگان، تحول ستارگان و منشأ کهکشانی پرتوهای کیهانی مهم هستند.

البته فراوانی‌های پرتوهای کیهانی در محدوده‌های مختلف انرژی این پرتوها متفاوت است. در محدوده‌ی زیر  $10^{12}$  eV تقریباً ۸۷٪ پروتون، ۱۲٪ هلیوم و ۱٪ عناصر سنگین تر هستند [۶]. در ناحیه  $10^{12}$  eV تا  $10^{15}$  eV، ترکیب تغییر می‌کند و در حدود ۵۰٪ پروتون، ۲۵٪ هلیوم، ۱۳٪ کربن، نیتروژن و اکسیژن و ۱۳٪ آهن می‌شود [۷].

فراوانی نسبی ایزوتوپ‌های رادیو اکتیو می‌تواند به تعیین فاصله اجرامی که آنها را ایجاد کرده اند کمک کند. در انرژی‌های پایین، که شار بیشتر است، ترکیب می‌تواند مستقیماً اندازه گیری شود. در انرژی‌های بالاتر، ترکیب از طریق مشاهده بهمن گسترده هوایی قابل استنباط است.

### ۳-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی

شکل ۳-۱ طیف پرتوهای کیهانی را که توسط آزمایشات گوناگونی در چند رصدخانه‌ی معتبر با متدهای شبیه‌سازی مختلف اندازه گیری شده است، نشان می‌دهد. برجسته ترین ویژگی، ثبات نسبی شار در سراسر محدوده عظیم انرژی‌ها است. با برهم‌نهی این نتایج و از روی مشاهده و تجربه می‌توان دید که شار پرتوهای کیهانی از یک توزیع قانون توانی تبعیت می‌کند (شکل ۱-۴):

$$N(E)dE \propto E^{-\gamma} dE$$

که  $\gamma$  شاخص طیفی شار نامیده می‌شود. نظاره نزدیکتر شکل نشان می‌دهد که از  $10^{11}$  eV تا بین  $10^{15}$  eV و  $10^{16}$  eV، شار، با افزایش انرژی، شاخص طیفی بین ۲/۵- و ۳- به نظر می‌رسد. در این ناحیه،  $\gamma$  یافت شده تقریباً ۲/۷- می‌باشد. فراتر از این ناحیه، طیف با ۳/۱-  $\sim \gamma$  ادامه می‌یابد تا اینکه در اطراف  $6 \times 10^{18}$  eV مجدداً ۲/۷-  $\gamma$  می‌شود. در اطراف  $6 \times 10^{19}$  eV، طیف دوباره سقوط می‌کند. این ویژگی طیف حد قطع جی زدکا<sup>۱</sup> نامیده می‌شود، و یک تئوری

<sup>۱</sup> 1 GZK cutoff

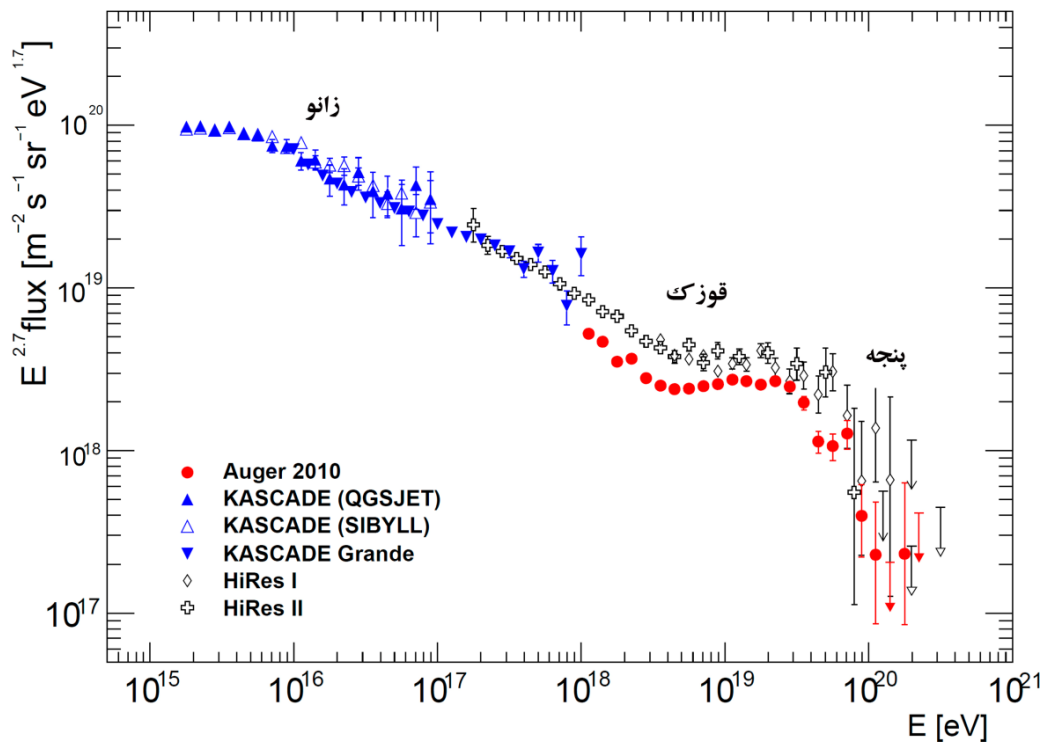
حد بالای شار پرتوهای کیهانی است. این ویژگی طیف برای مطالعه پرتوهای کیهانی بسیار مهم است. ویژگی در اطراف  $10^{15}$  eV به عنوان زانو<sup>۱</sup> شناخته می‌شود. ویژگی دوم که در اطراف انرژی  $10^{18}$  eV  $\times 6$  می‌باشد را قوزک<sup>۲</sup> نامیده‌اند.

ویژگی دیگر شکل ۱-۴ نرخ‌های رخداد است. در  $10^{11}$  الکترون‌ولت یک ذره در هر متر مربع در هر ثانیه قابل مشاهده است. در ناحیه زانو نرخ رخداد به یک ذره در هر متر مربع در هر سال افت می‌کند. در قوزک، نرخ ذره هنوز پایین تر است، در حدود یک ذره در هر کیلومتر مربع در هر سال. نهایتاً در اطراف  $10^{20}$  الکترون‌ولت نرخ رخداد به یک ذره در هر کیلومتر مربع در هر قرن افت می‌کند!

علائم و اختصارات در شکل یک روند در متد آشکارسازی پرتوهای کیهانی میان محدوده‌های انرژی گوناگون نشان می‌دهد. در انرژی‌های پایین، آزمایشات آشکارسازی با استفاده از بالون و ماهواره انجام می‌گیرند تا عبور پرتوهای کیهانی را به طور مستقیم مشاهده کنند. در این آزمایشات اندازه‌گیری مستقیم پرتوهای کیهانی با استفاده از کالری‌مترها یا آشکارسازهای تابش گذرا که در بالون‌ها یا ماهواره‌ها تعبیه شده، انجام می‌شود.

---

1 Knee  
2 Ankle



شکل ۱-۳: شار ثبت شده برای پرتوهای پرنرژی کیهانی توسط چند رصدخانه‌ی معتبر [۹]

زمانی که محدوده انرژی مورد مطالعه افزایش می‌یابد و شار خیلی افت می‌کند در نتیجه، با استفاده از مشاهده مستقیم دیگر ممکن نیست که رخدادهای کافی برای یک نمونه گیری آماری به اندازه کافی معتبر جمع آوری شود. در نتیجه باید به اندازه گیریهای غیرمستقیم یعنی تجزیه و تحلیل بهمن های هوایی که ذرات مولد آنها پرتوهای کیهانی می‌باشند، روی آورد. اندازه گیری های غیر مستقیم، که در آن ذره اولیه پرتو کیهانی به طور مستقیم قابل مشاهده نیست، ذراتی که در تعاملات ذره اولیه با مولکول های هوا در اتمسفر تولید شده اند آشکاسازی می‌شوند. مشاهدات غیر مستقیم توسط اندازه گیری چگالی و زمان های ورود الکترونها و مئون های تولید شده در بهمن گسترده هوایی در سطح زمین یا توسط بررسی نور فلورسانس تولید شده در اتمسفر، هنگامی که ذرات باردار، مولکول های نیتروژن را برانگیخته می‌کنند، بنا شده است.