



دانشگاه سمنان

دانشکده فیزیک

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

موضوع:

معرفی یک پارامتر جدید تفکیک جرمی در توزیع عرضی میون های

ثانویه ی پرتوهای کیهانی

توسط:

مطهره نجیمی

استاد راهنما:

دکتر گوهر رستگارزاده

بهمن ۱۳۹۱



دانشگاه سمنان

دانشکده فیزیک

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک

تحت عنوان:

معرفی یک پارامتر جدید تفکیک جرمی در توزیع عرضی میون های

ثانویه ی پرتوهای کیهانی

ارائه شده توسط:

مطهره نجیمی

در تاریخ ۳۰ بهمن ماه ۱۳۹۱ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

دکتر گوهر رستگرازاده

دکتر حسین غفارنژاد

دکتر مهرداد قمی نژاد

۱- استاد راهنما

۲- استاد داور داخلی

۳- استاد داور خارجی

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به :

همسر عزیزم

پدر و مادر مهربانم

دختر عزیزتر از جانم

و تمام کسانی که یاریم نمودند.

## تقدیر و تشکر:

سپاس بی‌کران پروردگار یکتا را که هستی‌مان بخشید و به طریق علم و دانش رهنمونمان شد و به همنشینی رهروان علم و دانش مفتخرمان نمود و خوشه‌چینی از علم و معرفت را روزیمان ساخت.

بی‌شک، انجام این پروژه و تدوین این پایان‌نامه بدون پیگیری‌ها، حمایت‌ها و راهنمایی‌های ارزشمند استاد گرانقدرم سرکار خانم گوهر رستگارزاده میسر نمی‌شد. بدین وسیله لازم می‌دانم کمال تشکر و قدردانی خود را از ایشان به عمل بیاورم.

از اساتید گرامی جناب آقای دکتر غفارنژاد و جناب آقای دکتر قمی نژاد که زحمت مطالعه و حضور در جلسه دفاع از پایان‌نامه اینجانب را برعهده داشتند، سپاس فراوان دارم.

## چکیده

پرتوهای کیهانی اتم های یونیزه و پرنرژی هستند که همواره با جو زمین برخورد می کنند. در برهمکنش این پرتوها با اتمسفر، آبخاری از ذرات ثانویه به نام "بهمن هوایی گسترده" ایجاد می شود. این پرتوها به دلیل شار خیلی کم، به خصوص در انرژی های بسیار بالا، فقط به صورت غیر مستقیم یعنی توسط آشکارسازهای زمینی قابل آشکارسازی هستند. سپس با استفاده از شبیه سازی های کامپیوتری و تحلیل توزیع ذرات ثانویه این پرتوها، انرژی، جهت و نوع پرتو اولیه بازسازی می شود، که اولین و مهمترین دلیل بررسی توزیع های عرضی ذرات ثانویه مانند الکترون ها و میون ها می باشد. توزیع های عرضی ذرات، مشخصه مهمی از پیشرفت بهمین در جو می باشد. خصوصا توزیع های میون ، که یک ابزار خوب برای فهم ما از فیزیک بهمین می باشد. زیرا میون ها به طرف سطح زمین اطلاعات تقریبا دست نخورده ای درباره ذرات تولیدکننده شان یعنی پایون ها و کائون ها با خود به همراه دارند، به طوریکه این ذرات فراوان ترین محصولات برهمکنش های هادرونی و عهده دار پیشرفت بهمین در جو هستند. با به دست آوردن تابع توزیع عرضی مناسب برای میون ها و الکترون ها ، شیب تابع توزیع عرضی ذرات به عنوان یک پارامتر تفکیک جرمی نتیجه شد.

کلمات کلیدی: پرتوهای کیهانی، بهمین گسترده ی هوایی، شیب توزیع عرضی، تفکیک جرمی

## فهرست مطالب

۱	پرتوهای کیهانی
۱-۱	مقدمه
۲-۱	پرتوهای کیهانی
۳-۱	طیف انرژی پرتوهای کیهانی
۴-۱	ترکیبات پرتوهای کیهانی
۵-۱	شتاب گیری و انتشار پرتوهای کیهانی
۶-۱	منشأ زانو
۱۱	بهمن های گسترده ی هوایی
۱-۲	بهمن های گسترده ی هوایی
۱-۲-۱	مؤلفه ی هادرونی
۲-۱-۲	مؤلفه ی میونی
۳-۱-۲	مؤلفه ی الکترومغناطیسی
۲-۲	روش های آشکارسازی بهمن های گسترده ی هوایی
۱-۲-۲	آشکارسازهای الکترون
۲-۲-۲	آشکارسازهای میون
۳-۲-۲	آشکارسازهای هادرون
۲۶	شبیه سازی بهمن های هوایی
۱-۳	شبیه سازی چیست؟
۲-۳	برهم کنش های موجود در یک برنامه ی شبیه سازی

۲۸	۱-۲-۳ برهم کنش های الکترومغناطیسی
۳۰	۲-۲-۳ واپاشی ذرات، برهم کنش ضعیف
۳۰	۳-۲-۳ برهم کنش های قوی
۳۱	۳-۳ KASCADE یک برنامه ی شبیه سازی
۳۲	۱-۳-۳ اجرای برنامه ی KASCADE
۳۴	۴-۳ CORSIKA یک برنامه ی دیگر شبیه سازی
۳۴	۱-۴-۳ مدل های برهم کنش
۳۷	۲-۴-۳ پارامترهای محیطی EAS و انتقال ذرات
۳۸	۳-۴-۳ عکس های CORSIKA از بهمن هوایی
۴۰	توزیع عرضی میون های EAS اندازه گیری شده با آشکارساز مسیریاب میون
۴۰	۱-۴ مقدمه
۴۱	۲-۴ آزمایش KASCADE-Grande
۴۲	۱-۲-۴ آرایه ی آشکارساز KASCADE
۴۴	۲-۲-۴ آشکارساز مرکزی
۴۵	۳-۲-۴ آرایه ی Grande
۴۵	۴-۲-۴ آرایه ی Piccolo
۴۶	۵-۲-۴ آشکارساز مسیریاب
۴۸	۳-۴ میون های مسیریاب در EAS
۴۸	۴-۴ توزیع عرضی چگالی میون
۵۱	توزیع عرضی شبیه سازی شده و اندازه گیری شده ی الکترون ها و میون ها توسط KASCADE
۵۱	۱-۵ مقدمه



۵۳	..... Monte-Carlo سازی شبیه سازی
۵۴	..... بازسازی توزیع چگالی ذره و پارامترهای بهمن
۵۴	..... بازسازی مؤلفه $e/\gamma$ ی
۵۵	..... بازسازی چگالی ذره
۵۷	..... بازسازی پارامترهای اندازه و شکل عرضی بهمن
۵۹	..... بازسازی مؤلفه ی میون
۶۱	..... معرفی پارامتر $\eta$ (شیب توزیع عرضی میون ها) و نتایج شبیه سازی
۶۱	..... ۱-۶ مقدمه
۶۲	..... ۲-۶ بررسی شیب تابع توزیع عرضی
۶۳	..... ۱-۲-۶ شیب تابع توزیع عرضی الکترون ها
۶۵	..... ۲-۲-۶ شیب تابع توزیع عرضی میون ها
۶۹	..... ۳-۶ مقایسه ی نتایج به دست آمده
۷۴	..... ۴-۶ عامل معیار توانایی جداسازی جرمی
۷۶	..... پیوست ها:
۸۲	..... مراجع:

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی ..... ۴
- شکل ۱-۲ فراوانی نسبی عناصر در ترکیبات منظومه ی شمسی و پرتوهای کیهانی ..... ۶
- شکل ۱-۲-۱ نمایی از یک بهمن گسترده ی هوایی ..... ۱۲
- شکل ۲-۲ قرص نازکی از ذرات بهمن هوایی ..... ۱۲
- شکل ۲-۳ نمایی از جبهه ی موج بهمن گسترده ی هوایی ..... ۱۳
- شکل ۲-۴ بهمن هوایی هادرونی (چپ) و الکترومغناطیسی (راست) ..... ۱۳
- شکل ۲-۵ توزیع طولی (چپ) و توزیع عرضی (راست) میون ..... ۱۶
- شکل ۲-۶ توزیع طولی (چپ) و توزیع عرضی (راست) الکترون ..... ۱۸
- شکل ۲-۷ آشکارسازی بهمن های هوایی پرتوکیهانی و پرتو گاما ..... ۱۹
- شکل ۲-۸ چیدمان آشکارساز سوسوزن ..... ۲۳
- شکل ۳-۱ عکس های CORSIKA از بهمن هوایی ..... ۳۹
- شکل ۴-۱ نقشه ای از آزمایش KASCADE-Grande (چپ) و آزمایش KASCADE (راست) ..... ۴۲
- شکل ۴-۲ نمایی از آشکارساز آرایه ی KASCADE (چپ) و نقشه ای از آشکارساز میون (راست) ..... ۴۳
- شکل ۴-۳ طرح کلی از آشکارساز مرکزی ..... ۴۵
- شکل ۴-۴ طرح کلی از آشکارساز مسیریاب میون ..... ۴۶
- شکل ۴-۵ طرحی از اتاقک MTD ..... ۴۷
- شکل ۴-۶ توزیع چگالی عرضی میون به دست آمده با MTD (نمادها) و آشکارسازهای میون KASCADE (خطوط) ..... ۴۹
- شکل ۴-۷ مقایسه ی توزیع MTD با شبیه سازی های CORSIKA ..... ۵۰
- شکل ۵-۱ گسترش فضایی بهمن هوایی در جو ..... ۵۲
- شکل ۵-۲ پروتون LECF (چپ) و توزیع عرضی الکترون (راست) ..... ۵۶
- شکل ۵-۳ مقایسه ی نتایج تابع NKG اصلاح شده و تابع اصلی برای پارامترهای شکل عرضی (راست) و تخمین اندازه ی کل بهمن توسط هر دو تابع برازش ..... ۵۸

شکل ۴-۵ مقایسه ی توزیع عرضی میون بهمن های شبیه سازی شده با توزیع های واقعی CORSIKA ..... ۶۰

شکل ۱-۶ منحنی توزیع عرضی الکترون اولیه ی پروتون با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۱) برازش داده ایم. .... ۶۳

شکل ۲-۶ منحنی توزیع عرضی الکترون اولیه ی هلیوم با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۱) برازش داده ایم. .... ۶۳

شکل ۳-۶ منحنی توزیع عرضی الکترون اولیه ی اکسیژن با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۱) برازش داده ایم. .... ۶۴

شکل ۴-۶ منحنی توزیع عرضی الکترون اولیه ی سدیم با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۱) برازش داده ایم. .... ۶۴

شکل ۵-۶ منحنی توزیع عرضی الکترون اولیه ی آهن با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۱) برازش داده ایم. .... ۶۴

شکل ۶-۶ منحنی توزیع عرضی میون اولیه های مختلف با انرژی  $10^{14} \text{ev}$  که با رابطه ی (۱) برازش داده ایم. .... ۶۶

شکل ۷-۶ منحنی توزیع عرضی میون اولیه ی پروتون با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۴) برازش داده ایم. .... ۶۷

شکل ۸-۶ منحنی توزیع عرضی میون اولیه ی هلیوم با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۴) برازش داده ایم. .... ۶۷

شکل ۹-۶ منحنی توزیع عرضی میون اولیه ی اکسیژن با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۴) برازش داده ایم. .... ۶۷

شکل ۱۰-۶ منحنی توزیع عرضی میون اولیه ی سدیم با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۴) برازش داده ایم. .... ۶۷

شکل ۱۱-۶ منحنی توزیع عرضی میون اولیه ی سیلیسیوم با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۴) برازش داده ایم. .... ۶۸

شکل ۱۲-۶ منحنی توزیع عرضی میون اولیه ی کلسیم با انرژی های  $10^{14} \text{ev}$  (راست) و  $10^{15} \text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۴) برازش داده ایم. .... ۶۸

- شکل ۶-۱۳ منحنی توزیع عرضی میون اولیه ی آهن با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ) که با رابطه ی (۴) برازش داده ایم. .... ۶۸
- شکل ۶-۱۴ مقایسه ی منحنی های توزیع عرضی الکترون و میون اولیه ی پروتون با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ) ..... ۷۰
- شکل ۶-۱۵ مقایسه ی منحنی های توزیع عرضی الکترون و میون اولیه ی هلیوم با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ). .... ۷۰
- شکل ۶-۱۶ مقایسه ی منحنی های توزیع عرضی الکترون و میون اولیه ی اکسیژن با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ) ..... ۷۰
- شکل ۶-۱۷ مقایسه ی منحنی های توزیع عرضی الکترون و میون اولیه ی سدیم با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ). .... ۷۰
- شکل ۶-۱۸ مقایسه ی منحنی های توزیع عرضی الکترون و میون اولیه ی سیلیسیوم با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ) ..... ۷۱
- شکل ۶-۱۹ مقایسه ی منحنی های توزیع عرضی الکترون و میون اولیه ی کلسیم با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ). .... ۷۱
- شکل ۶-۲۰ مقایسه ی منحنی های توزیع عرضی الکترون و میون اولیه ی آهن با انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  (راست) و  $10^{15}\text{ev}$  (چپ) ..... ۷۱
- شکل ۶-۲۱ مقایسه ی تغییرات شیب توزیع عرضی الکترون بر حسب عدد جرمی بین انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  و  $10^{15}\text{ev}$ .  $\eta_1$  بر حسب A (راست) و  $\eta_2$  بر حسب A (چپ) ..... ۷۲
- شکل ۶-۲۲ مقایسه ی تغییرات شیب توزیع عرضی میون بر حسب عدد جرمی بین انرژی های  $10^{14}\text{ev}$  و  $10^{15}\text{ev}$ .  $\eta_1$  بر حسب A (راست) و  $\eta_2$  بر حسب A (چپ) ..... ۷۲
- شکل ۶-۲۳ مقایسه ی تغییرات شیب توزیع عرضی میون و الکترون بر حسب عدد جرمی در انرژی  $10^{14}\text{ev}$ .  $\eta_1$  بر حسب A (راست) و  $\eta_2$  بر حسب A (چپ) ..... ۷۲
- شکل ۶-۲۴ مقایسه ی تغییرات شیب توزیع عرضی میون و الکترون بر حسب عدد جرمی در انرژی  $10^{15}\text{ev}$ .  $\eta_1$  بر حسب A (راست) و  $\eta_2$  بر حسب A (چپ) ..... ۷۳

- شکل ۶-۲۵ مقایسه ی تغییرات شیب توزیع عرضی میون و الکترون بر حسب انرژی.  $\eta_1$  بر حسب  $\log E$
- ۷۳ .....(راست) و  $\eta_2$  بر حسب  $\log E$  (چپ).....
- شکل ۶-۲۶ هیستوگرام ذرات مختلف ..... ۷۴.....
- شکل ۶-۲۷ نمودار تغییرات MF بر حسب  $\Delta m$  برای پارامتر  $\eta_e$  (راست) و پارامتر  $\eta_\mu$  (چپ) در انرژی
- ۷۵.....  $10^{14} \text{ev}$
- شکل ۶-۲۸ نمودار تغییرات MF بر حسب  $\Delta m$  برای پارامتر  $\eta_e$  (راست) و پارامتر  $\eta_\mu$  (چپ) در انرژی
- ۷۵.....  $10^{15} \text{ev}$

## فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱ ذرات بررسی شده در برنامه ی KASCADE ..... ۳۲
- جدول ۴-۱ مهمترین مشخصات مؤلفات مختلف آشکارساز KASCADE-Grande ..... ۴۷
- جدول ۶-۱ نتایج نهایی به دست آمده از توزیع عرضی الکترون برای اولیه های مختلف در انرژی  $10^{14} \text{ev}$  ..... ۶۵
- جدول ۶-۲ نتایج نهایی به دست آمده از توزیع عرضی الکترون برای اولیه های مختلف در انرژی  $10^{15} \text{ev}$  ..... ۶۵
- جدول ۶-۳ نتایج نهایی به دست آمده از توزیع عرضی میون برای اولیه های مختلف در انرژی  $10^{14} \text{ev}$  ..... ۶۹
- جدول ۶-۴ نتایج نهایی به دست آمده از توزیع عرضی میون برای اولیه های مختلف در انرژی  $10^{15} \text{ev}$  ..... ۶۹

## فصل اول

# پرتوهای کیهانی

### ۱-۱ مقدمه

تا پیش از اختراع تلسکوپ، اطلاعات ما از اجرام آسمانی حداکثر محدود به پیش بینی موقعیت آن ها و یا برخی از رویدادهای آسمانی مانند تلسکوپ بود. اختراع تلسکوپ حجم اطلاعات ما درباره ی فضای اطرافمان را به نحو چشمگیری افزایش داد. با این همه دویست سال زمان لازم بود تا دانشمندان کشف کردند که اجرام آسمانی نه تنها در گستره ی نور مرئی که چشم انسان قادر به دیدن آن است، بلکه در طول موج های دیگر نیز تابش می کنند. هر آشکارسازی که دانشمندان را قادر به مشاهده ی اجرام آسمانی در یک طول موج جدید می کرد، منجر به کشف اجرام جدیدی شد که در طول موج های مشاهده شده ی قبلی دیده نشده بود.

علاوه بر مشاهده ی جهان با استفاده از امواج الکترومغناطیسی، پرتوهای کیهانی نیز اکنون به یکی از مهمترین ابزار شناخت اجرام متنوع آسمانی در اعماق فضا مبدل شده اند. پرتوهای کیهانی اولین بار توسط

ویکتور هس<sup>۱</sup> کشف شدند و در انرژی های مختلف با استفاده از روش های گوناگون آشکارسازی مطالعه شدند. فوتون های پرتوهای کیهانی باردار که بیشتر آن ها از پروتون ها و ذرات آلفا تشکیل شده اند، در میدان های الکتریکی و مغناطیسی مانند میدان های کهکشان ما، خورشید و زمین منحرف می شوند. بنابراین وقتی که به زمین می رسند اطلاعاتی درباره ی جهت چشمه ی تولید کننده ی آن ها در بر ندارند. فقط در انرژی های بسیار بالاست که پرتوهای کیهانی می توانند بدون انحراف از میدان های مغناطیسی عبور کرده و به زمین برسند.

ذرات باردار کیهانی، کافی است که به اندازه ی چند برخورد و چند مرحله تولید ذرات ثانویه انرژی داشته باشند تا بتوانند بهمن هوایی تولید کنند. در اصطلاح وقتی صحبت از بهمن های گسترده ی هوایی مطرح می شود، بهمن هایی مورد توجه هستند که ذرات ثانویه ی آن ها تا سطح زمین برسند یا به عبارت بهتر، بهمن هایی که انرژی آن ها از یک حد آستانه بیشتر باشد. برای محل رصدخانه ی البرز واقع در دانشگاه صنعتی شریف با ارتفاع ۱۲۰۰ m بالاتر از سطح دریا، این حد آستانه ی انرژی حدود ۵۰ Tev است. قوی ترین شتاب دهنده های ذرات ساخته ی بشر، می تواند پروتون ها را تا حدود ۱ Tev شتاب دهد، بنابراین مشاهده ی بهمن های گسترده هوایی ایجاد شده توسط برهم کنش های پرتوهای کیهانی اولیه با ذرات جوی در بالای جو ، هنوز تنها منبع اطلاعات ما در رابطه با پرتوهای کیهانی اولیه و برهم کنش های هادرونی در انرژی های بالاتر از ۱ Tev است.

با این حال این اطلاعات در سرشت این فرایند آبخاری نهان شده است علی رغم تلاش های تجربی و تئوری فراوان، نتایج مطالب اغلب مبهم و پیچیده اند. این موضوع تا حدی می تواند به دلیل نقص موجود در تحلیل و مدل های ما از برهم کنش های ذرات پرانرژی و بخشی نیز، ناشی از فرآیندهای تصادفی در تشکیل یک بهمن گسترده هوایی باشد. کسی نمی تواند ادعا کند که همه ی خصوصیات و ویژگی های بهمن هوایی ای را که می بینیم دریافته ایم و مطمئناً نیاز به بهبود شناخت خود از بهمن های گسترده هوایی داریم. در ادامه ابتدا به بررسی ذرات کیهانی اولیه که منشأ ایجاد بهمن های گسترده هوایی هستند می پردازیم و پس از آن به بررسی جزئیات بیشتری از بهمن ها خواهیم پرداخت.

## ۲-۱ پرتوهای کیهانی

ذرات باردار پرانرژی که از فضای خارج وارد جو زمین می شوند، پرتوهای کیهانی نام دارند. ویکتور هس، فیزیکدان اتریشی اولین بار در طی پرواز با بالن در سال ۱۹۱۲، با اندازه گیری مقدار یونش هوا در

<sup>۱</sup> Victor-Hess



ارتفاعات مختلف، تابش کیهانی را کشف کرد. در سال ۱۹۳۹ پیر اوژ<sup>۱</sup> بهمن های گسترده هوایی را با استفاده از آشکارسازهای جدا از هم کشف کرد [۶]. او رویدادهای هم زمان را در آشکارسازهای مجزا مشاهده نمود و بنابراین نتیجه گرفت که ذرات اولیه ی پرتوهای کیهانی در برهمکنش با مولکول ها و اتم های جو زمین یک بهمن گسترده هوایی را به وجود می آورند. از آن زمان تا کنون جنبه های متفاوتی از پرتوهای کیهانی بررسی و کشف شده است. اکنون مشخص شده است که پرتوهای کیهانی متشکل از انواع گوناگونی از ذرات باردار مثل پروتون ها، الکترون ها و هسته های اتمی کاملاً یونیزه است. انرژی ذرات اولیه گستره ی وسیعی در حدود ۱۱ مرتبه ی بزرگی از  $10^9$  eV تا  $10^{20}$  eV را می پوشاند. ولی هنوز سؤالات بنیادی ای وجود دارد که پاسخی برای آن ها نیافته ایم، مثلاً نوع چشمه های ایجاد کننده ی پرتوهای کیهانی، سازوکارهای شتاب گیری ذرات تا این انرژی های بالا.

### ۳-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی

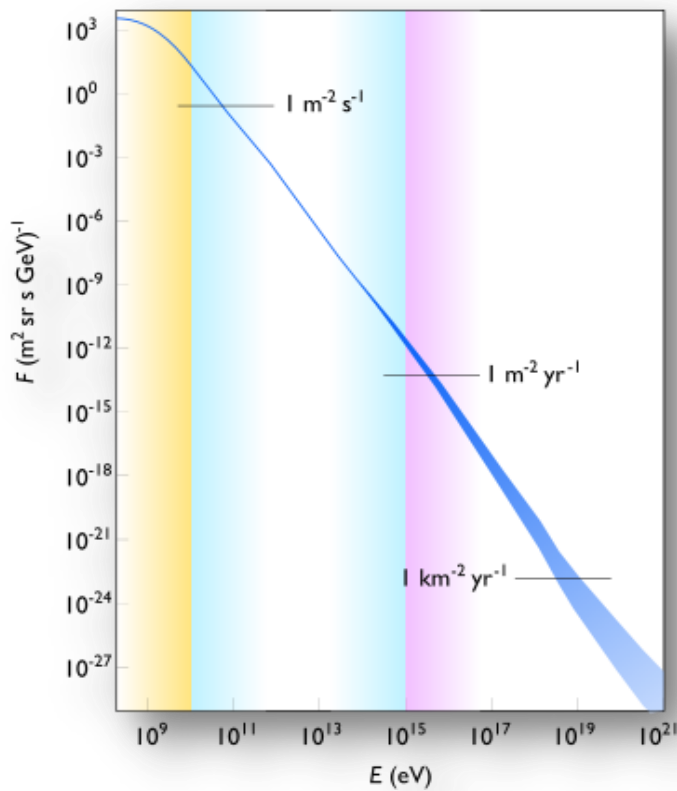
از زمان کشف پرتوهای کیهانی، آزمایش های متعددی طیف انرژی آن ها را اندازه گیری کرده اند. طیف انرژی پرتوهای کیهانی در گستره ی انرژی، ۱۱ مرتبه ی بزرگی و در محدوده شار پرتوهای کیهانی  $30$  مرتبه ی بزرگی را می پوشاند. در شکل ۱-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی را می بینید. طیف انرژی به صورت یک قانون توانی<sup>۲</sup> نشان داده می شود:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

که در آن شاخص طیفی،  $\gamma$ ، در محدوده ی  $2/5$  تا  $3/2$  قرار دارد. تا محدوده ی انرژی کمتر از  $100$  TeV، ذرات را می توان به طور مستقیم در آشکارسازهایی که روی بالن یا ماهواره ها سوار هستند، مشاهده کرد. اما در انرژی های بالاتر شار آنقدر کم می شود که نمی توان پرتوهای کیهانی را به طور مستقیم مشاهده کرد. چون سطوح آشکارسازی که از مرتبه ۱ مترمربع است، برای این منظور بسیار کوچک است. بنابراین محققان این پرتوها را به طور غیر مستقیم با اندازه گیری بهمن های گسترده هوایی تولید شده توسط آن ها اندازه گیری می کنند. این آزمایش های زمینی از جو زمین به عنوان محیط آشکارسازی استفاده می کنند و بنابراین در مقایسه با آزمایش - های سوار بر بالن یا ماهواره، مساحت آشکارسازی به مقدار چشمگیری افزایش می یابد.

<sup>۱</sup> Pierre-Auger

<sup>۲</sup> Power law



شکل ۱-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی

شاخص طیف انرژی در جاهایی عوض می شود. اولین آنها زانو<sup>۱</sup> نامیده می شود و اولین بار در سال ۱۹۵۸ کشف شد [۷]. در انرژی های حدود ۴ PeV شاخص طیف از مقدار ۲/۷ به مقدار ۳/۱ تغییر می کند. وجود زانوی دوم در انرژی های در حدود  $4 \times 10^{17} \text{ eV}$  بر مبنای برخی آزمایش ها پیشنهاد شده است [۸،۹،۱۰،۱۱]. در این آزمایش ها شاخص طیفی از ۳/۰ به ۳/۳ تغییر می کند. از طرف دیگر برخی از آزمایش های دیگر چنین تغییری را در طیف انرژی ذرات مشاهده نکردند [۱۲،۱۳] بنابراین وجود این ساختار تأیید نشده است.

ساختار دیگر طیف پرتوهای کیهانی قوزک<sup>۲</sup> نامیده می شود. در انرژی های حدود  $5 \times 10^{18} \text{ eV}$  شاخص طیف از مقدار ۳/۱ به مقدار ۲/۷۵ تغییر می کند. منشأ این تغییر شاخص طیف را می توان با گذار از پرتوهای کیهانی کهکشانی به پرتوهای کیهانی فراکهکشانی توضیح داد.

<sup>۱</sup> knee<sup>۲</sup> Ankle

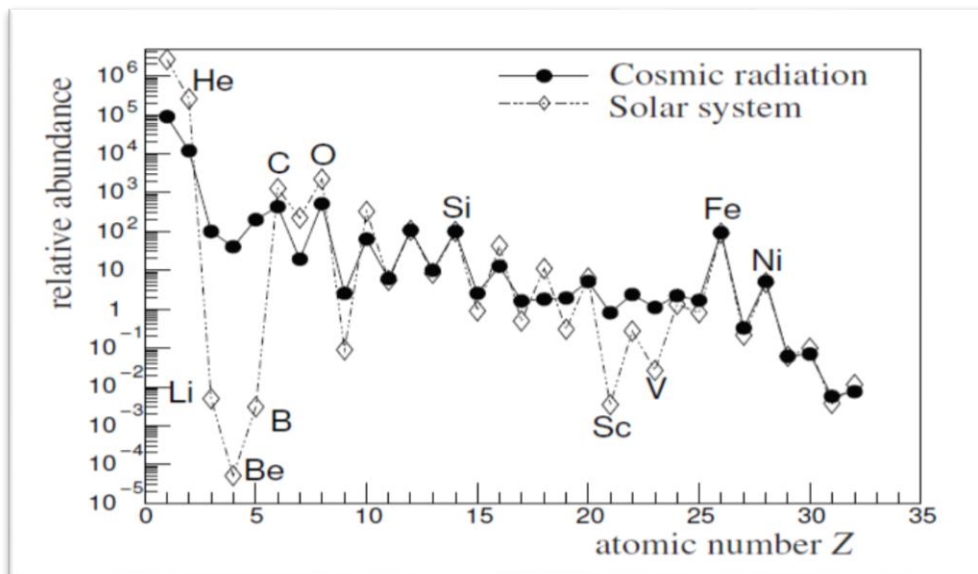
سرانجام آخرین جنبه ی طیف انرژی توسط گرایزن، زاتسپین و کازمین<sup>۱</sup> پیش بینی شده است [۱۴،۱۵]. در انرژی های بیش از  $5 \times 10^{19} \text{ eV}$  انرژی فوتون های تابش زمینه در دستگاه سکون پروتون، از مرتبه ی  $200 \text{ MeV}$  است. که این مقدار بیش از انرژی آستانه ی تولید پایون است. بنابراین مادامی که انرژی فوتون های پس زمینه بالاتر از مقدار آستانه ی تولید پایون باشد، پرتوهای کیهانی بسیار پرانرژی، انرژی خود را در طی این فرآیندها از دست می دهند. فرض بر این است که منشأ ذرات بسیار پرانرژی با انرژی بیش از این، فراهکشانی است و بنابراین باید یک خط برش در طیف انرژی مشاهده شود. به این خط برش، خط برش  $\text{GZK}$  می گویند. هنوز مشخص نیست که آیا چنین خط برشی در طیف وجود دارد یا خیر؟ در اندازه گیری های آگاسا [۱۳] کاهش شار پرتوهای کیهانی اولیه تا انرژی های حدود  $10^{20} \text{ eV}$  مشاهده نشده است که دلالت بر عدم وجود چنین خط برشی دارد. ولی نتایج هایرس<sup>۲</sup> [۱۶]، وجود چنین خط برشی را در انرژی های حدود  $5 \times 10^{19} \text{ eV}$  تأیید می کند. ولی هنوز این موضوع بحث برانگیز است و توافقی در مورد آن وجود ندارد.

## ۴-۱ ترکیبات پرتوهای کیهانی

مطالعه ی ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی می تواند در شناخت منبع تولیدکننده ی آن ها و سازوکار شتاب گیری آن ها به ما کمک کند. فقط برای انرژی های تا حد  $10^{14} \text{ eV}$ ، ترکیب شیمیایی پرتوهای کیهانی دقیقاً شناخته شده است. چون تا این انرژی ها آزمایش های سوار بر ماهواره ها و بالن ها ذرات اولیه را مستقیماً اندازه گیری کرده اند. تا این انرژی ها تابش کیهانی شامل ۹۸٪ هادرون و ۲٪ الکترون و فوتون است. ۸۵٪ مؤلفه ی هادرونی پروتون، ۱۲/۵٪ آن ها هسته های هلیوم و بقیه ی آن هسته های سنگین تر تا آهن هستند. در شکل ۱-۲ فراوانی نسبی عناصر مختلف در منظومه شمسی در مقایسه با فراوانی نسبی آن ها در تابش کیهانی آمده است [۱۷،۱۸،۱۹].

<sup>۱</sup> Greisen, Zatsepin and Kuzmin(GZK)

<sup>۲</sup> HiRes/High Resolution Fly's Eye Cosmic Ray Detector



شکل ۱-۲ فراوانی نسبی عناصر در ترکیبات منظومه شمسی و پرتوهای کیهانی

همه ی فراوانی ها به فراوانی سیلکن به هنجار شده است. فراوانی ها در منظومه شمسی و در تابش کیهانی در توافق خوبی هستند که براین دلالت دارد که منابع تولید کننده ی تابش کیهانی از این نظر که عناصر تشکیل دهنده آن ها حاصل واکنش های هسته ای هستند، مشابه خورشید می باشند. اما ناسازگاری هایی نیز وجود دارد:

اول اینکه دو گروه از عناصر، لیتیم (Li)، برلیوم (Be) و بور (B) در بین عناصر سبک و اسکاندیم (Sc)، تیتانیم (Ti)، وانادیم (V)، کروم (Cr) و منیزیم (Mn) در بین عناصر سنگین تر در پرتوهای کیهانی فراوانی بیشتری در مقایسه با ترکیبات منظومه شمسی دارند. در طی فرآیندهای هسته ای آهنگ تولید این عناصر بسیار کم است. این عناصر حاصل شکافت گروه CNO (کربن، نیترون و اکسیژن) در عناصر سبک و گروه آهن برای عناصر سنگین در هنگام برخورد با محیط بین ستاره ای هستند.

دوم اینکه فراوانی هیدروژن و هلیم در پرتوهای کیهانی در مقایسه با منظومه شمسی کمتر است. در برخی از مدل های شتاب گیری، تنها ذرات باردار می توانند به شکل کارآمد شتاب بگیرند. انرژی های یونس هیدروژن و هلیم نسبتاً بالا است، بنابراین این عناصر به مقدار کافی یونیزه نشده و شتاب نمی گیرند. در نتیجه فراوانی این عناصر در پرتوهای کیهانی در مقایسه با منظومه شمسی کمتر است. دلیل این ناسازگاری هرچه باشد، نظریه هایی که منشأ و سازوکارهای تابش های کیهانی را توصیف می کنند، باید این اختلاف های چشمگیر را توضیح دهند. بنابراین آزمایش های بهمن های هوایی سعی در شناخت ترکیب شیمیایی پرتوهای کیهانی اولیه در انرژی های بیش از  $10^{14}$  eV دارند.