

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه سمنان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرانش و نجوم)

موضوع:

انتشار پرتوهای کیهانی در فضای بین ستاره‌ای

توسط:

بهاره پرویزی

استاد راهنما:

دکتر گوهر رستگارزاده

مهر ۱۳۹۳



دانشگاه سمنان

دانشکده فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک (گرانش و نجوم)

تحت عنوان:

انتشار پرتوهای کیهانی در فضای بین ستاره‌ای

ارائه شده توسط:

بهاره پرویزی

در تاریخ ۷ مهر ۱۳۹۳ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت:

دکتر گوهر رستگرازاده

دکتر حسین غفارنژاد

دکتر نفیسه معماریان

۱- استاد راهنما

۲- استاد داور داخلی

۳- استاد داور داخلی

تقدیم به :

پدر و مادر عزیزم

به پاس محبتِ بی دریغشان

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 دکتر 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 حسین غفارنژاد و سرکار خانم دکتر نفیسه معماریان که زحمت مطالعه و حضور در جلسه دفاع از پایان‌نامه اینجانب را برعهده داشتند، سپاس فراوان دارم.

چکیده

این پایان نامه انتشار پرتوهای کیهانی به غایت پر انرژی در فضای بین ستاره‌ای را مورد بررسی قرار می‌دهد. پرتوهای کیهانی در طول انتشارشان از منبع تا زمین دستخوش اندرکنش‌های اتلاف انرژی مختلفی شده و انرژی خود را ازدست می‌دهند و به ذرات سبکتر از خود تبدیل خواهند شد. ما می‌توانیم با ردیابی این ذرات ثانویه‌ی تولید شده (فوتونها و نوترینوها)، اطلاعات مفیدی در راستای پیدا کردن منابع پرتوهای کیهانی بدست آوریم.

با استفاده از گد CRPropa نسخه ۲/۰ شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی انتشار پرتوهای کیهانی به غایت پرانرژی برای منابع با ساختارهای جرمی مختلف از جمله هلیوم، کربن، نیتروژن، اکسیژن، کلسیم، آهن صورت گرفته است. میدان مغناطیسی برای شبیه‌سازی سه‌بعدی 10 nG و در راستای Z در نظر گرفته شده است. طیف پرتوهای کیهانی ثانویه و توزیع نوترینوها برای انرژی‌های بالای 10^{18} eV بدست آمده است و نشان داده شده که طیف پرتوهای کیهانی در انرژی‌های بالا سبکتر بوده و توزیع نوترینوها دارای دو قله در انرژی‌های $10^{16/9} \text{ eV}$ و $10^{18/9} \text{ eV}$ می‌باشد. برای منبع آهن قله‌ی بلندتر به نوترینوهای کم انرژی و برای منبع پروتون به نوترینوهای پرانرژی مربوط می‌شود که بر این اساس، منبع با ساختار جرمی پروتون خالص تعداد بیشتری نوترینوی پر انرژی نسبت به ساختار آهن خالص تولید می‌کند. همچنین نشان داده شده است که در یک انرژی ثابت هسته‌های سنگین نسبت به هسته‌های سبک، بیشتر تحت تأثیر میدان‌های مغناطیسی قرار می‌گیرند. و به طور کلی با افزایش شاخص طیفی تعداد ذرات کاهش می‌یابد. همچنین منحنی میانگین لگاریتمی پرتوهای کیهانی بر حسب انرژی هم بدست آمده است و بر طبق این منحنی‌ها بعد از قوزک (انرژی 10^{18} eV) ساختار جرمی پرتوکیهانی سبک بوده و بعد از انرژی 10^{19} eV ساختار جرمی سنگین می‌شود که با نتایج تجربی سازگار است. علاوه بر این تأثیر میدان مغناطیسی بر روی ساختار بررسی شده است و این نتیجه حاصل شد که در حضور میدان مغناطیسی فرا کهکشانی، ساختار سبکتر است، چون انحراف ناشی از میدان، مسیر انتشار را افزایش می‌دهد و در نتیجه تعداد اندرکنش‌ها بیشتر می‌شود و میانگین عدد جرمی $\langle A \rangle$ کاهش می‌یابد. و در نهایت اینکه با افزایش شاخص طیفی ساختار جرمی سنگینتر می‌شود.

کلمات کلیدی: انتشار پرتوهای کیهانی به غایت پرانرژی، هادرون‌ها و نوترینوهای ثانویه، شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی، ساختار جرمی، CRPropa، میدان‌های مغناطیسی فراکهکشانی

فهرست مطالب

فصل ۱

- پرتوهای کیهانی..... ۱
- ۱-۱ کشف پرتوهای کیهانی ۱
- ۲-۱ طیف پرتوهای کیهانی ۴
- ۳-۱ ترکیبات پرتوهای کیهانی ۶
- ۴-۱ منابع پرتوهای کیهانی ۷
- ۱-۴-۱ ابرنواخترها..... ۸
- ۲-۴-۱ هسته‌های کهکشانی فعال..... ۱۰
- ۵-۱ فضای بین ستاره‌ای..... ۱۱
- ۶-۱ نقش پرتوهای کیهانی در زندگی ما ۱۲

فصل ۲

- بهمن‌های گسترده هوایی و روش‌های آشکارسازی آنها ۱۵
- ۱-۲ بهمن‌های گسترده هوایی ۱۵
- ۱-۱-۲ مؤلفه‌ی هادرونی ۱۷
- ۲-۱-۲ مؤلفه‌ی الکترومغناطیسی ۱۸
- ۲-۲ آشکارسازی پرتوهای کیهانی..... ۱۹
- ۳-۲ آشکارسازهای پرتوهای کیهانی..... ۲۰
- ۴-۲ روش‌های آشکارسازی پرتوهای کیهانی..... ۲۲
- ۱-۴-۲ آشکارسازی با بالن و ماهواره..... ۲۲

- ۲-۴-۲ آرایه‌های بهمن‌های گسترده‌ی هوایی..... ۲۲
- ۲-۴-۳ آشکارسازی نور چرنکوف ذرات ثانویه..... ۲۴
- ۲-۴-۳-۱ آشکارسازی آبی چرنکوف..... ۲۶
- ۲-۴-۴ آشکارسازی نور فلورسانس ذرات ثانویه..... ۲۶
- ۲-۴-۵ آشکارسازی نوترینوها..... ۲۷
- ۲-۴-۶ آشکارسازی پرتوهای کیهانی به غایت پرانرژی با انرژی بیش از 10^{17} eV..... ۲۸

فصل ۳

- ۳۰..... بررسی تغییرات ترکیب جرمی با استفاده از برنامه شبیه‌سازی سی آر پروپا..... ۳۰
- ۳-۳-۱ شبیه‌سازی پرتوهای کیهانی..... ۳۰
- ۳-۳-۲ برنامه شبیه‌سازی سی آر پروپا..... ۳۱
- ۳-۳-۳ ساختار برنامه..... ۳۲
- ۳-۳-۱ پارامترهای عمومی فایل ورودی..... ۳۳
- ۳-۳-۲ فایل خروجی..... ۳۶
- ۳-۳-۴ نحوه‌ی شبیه‌سازی..... ۳۷
- ۳-۳-۵ ساختار جرمی..... ۳۸
- ۳-۳-۶ تأثیر میدان مغناطیسی بر روی ساختار جرمی پرتوهای کیهانی ثانویه..... ۴۱
- ۳-۳-۷ تأثیر شاخص طیفی بر روی ساختار جرمی پرتوهای کیهانی ثانویه..... ۴۶

فصل ۴

- انتشار پرتوهای کیهانی..... ۵۰
- ۴-۱ فرآیندهای اتلاف انرژی..... ۵۰
- ۴-۱-۱ اتلاف انرژی اندرکنش‌های الکترومغناطیسی..... ۵۲

| | |
|----|--|
| ۵۵ | ۲-۱-۴ اتلاف انرژی اندرکنش‌های هادرونی |
| ۵۷ | ۲-۴ سازوکار تولید ذرات ثانویه |
| ۵۷ | ۱-۲-۴ اندرکنش‌های پروتون‌های پرتوهای کیهانی با تابش‌های زمینه‌ی کیهانی |
| ۵۸ | ۲-۲-۴ اندرکنش‌های هسته‌های پرتوهای کیهانی با تابش‌های زمینه‌ی کیهانی |
| ۵۹ | ۳-۴ تولید نوترینوهای کیهانی |
| ۵۹ | ۴-۴ طیف نوترینوهای کیهانی |
| ۶۳ | ۵-۴ تأثیر میدان مغناطیسی بر روی طیف نوترینوهای کیهانی |
| ۶۷ | ۶-۴ تأثیر شاخص طیفی بر روی طیف نوترینوهای کیهانی |
| ۷۰ | ۷-۴ طیف هادرون‌های ثانویه |
| ۷۲ | ۸-۴ تأثیر میدان مغناطیسی بر روی طیف هادرون‌های ثانویه |
| ۷۶ | ۹-۴ تأثیر شاخص طیفی بر روی طیف هادرون‌های ثانویه |
| ۷۹ | مراجع: |

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ تصویری از ویکتور هس، کاشف پرتوهای کیهانی ۲
- شکل ۱-۲ شتابدهنده‌ی طبیعی SN1987A و شتابدهنده‌ی ساخته‌ی دست انسان ۴
- شکل ۱-۳ طیف انرژی پرتوهای کیهانی ۵
- شکل ۱-۴ فراوانی نسبی عناصر در ترکیبات منظومه‌ی شمسی و پرتوهای کیهانی ۷
- شکل ۱-۵ ابرنواختر ۸
- شکل ۱-۶ کهکشان فعال M87 ۱۰
- شکل ۱-۲ گسترش بهمن ۱۶
- شکل ۲-۲ نمایش پراکندگی ذرات بهمن هوایی ناشی از فوتون و ناشی از هادرون در انرژی ۱ TeV ۱۹
- شکل ۲-۳ روش‌های آشکارسازی پرتوهای کیهانی در بازه انرژی‌های مختلف ۲۰
- شکل ۲-۴ طرح‌واره‌ای از رسیدن ذرات بهمن به آرایه‌ای از آشکارسازها و تعیین جهت بهمن ۲۳
- شکل ۲-۵ آشکارساز زمینی تبت ۲۴
- شکل ۲-۶ چهار تلسکوپ آشکارساز نور چرنکوف مستقر در رصدخانه هس که در نامیبیا واقع است ۲۵
- شکل ۲-۷ محل قرارگیری تلسکوپ‌ها در آزمایش هس واقع در نامیبیا ۲۵
- شکل ۲-۸ نمایشی از آشکار سازهای فلورسانس چشم مگس ۲۷
- شکل ۲-۹ نمای کلی از محل استقرار آشکارسازهای Ice Cube واقع در قطب جنوب ۲۸
- شکل ۲-۱۰ تصویری از آشکارساز چرنکوف به کار رفته در پیر اوژه واقع در آرژانتین ۲۹
- شکل ۳-۱ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی برای منابع با ساختار هلیم، کربن، نیتروژن، اکسیژن، نئون، سیلیسیم، کلسیم، آهن (خالص) با شاخص طیفی $1/4$ و بیشینه انرژی 10^{21} eV برای شبیه‌سازی یک‌بعدی ۳۹
- شکل ۳-۲ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی که توسط آزمایش‌های مختلف بدست آمده است ۴۱
- شکل ۳-۳ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی برای منابع با ساختار هلیم، کربن، اکسیژن، نئون، سیلیسیم، کلسیم (خالص) با بیشینه انرژی 10^{21} eV و شاخصهای طیفی $1/4$ و 2 برای شبیه‌سازی سه‌بعدی ۴۳
- شکل ۳-۴ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی برای منبع با ساختار آهن خالص و شاخص طیفی $1/4$ با بیشینه انرژی 10^{21} eV برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی ۴۵

شکل ۳-۵ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی برای منبع با ساختار آهن خالص و شاخص طیفی ۲ با بیشینه انرژی 10^{21} eV برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی..... ۴۵

شکل ۳-۶ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی برای منابع با ساختار هلیوم، کربن، نیتروژن، اکسیژن، نئون، سیلیسیم، کلسیم، آهن (خالص) و شاخص طیفی ۲ با بیشینه انرژی 10^{21} eV برای شبیه‌سازی یک-بعدی..... ۴۷

شکل ۳-۷ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی برای منبع با ساختار آهن خالص و شاخص‌های طیفی $1/4$ و ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۴۸

شکل ۳-۸ میانگین لگاریتمی جرم بر حسب انرژی برای منبع با ساختار آهن خالص و شاخص‌های طیفی $1/4$ و ۲ برای شبیه‌سازی سه‌بعدی..... ۴۹

شکل ۴-۱ مسیر یک پروتون پرتو کیهانی از منبع تا سطح زمین..... ۵۱

شکل ۴-۲ یونیزاسیون..... ۵۲

شکل ۴-۳ پراکندگی کولمب..... ۵۳

شکل ۴-۴ تابش ترمزی..... ۵۳

شکل ۴-۵ پراکندگی کامپتون..... ۵۴

شکل ۴-۶ تابش سینکروترونی..... ۵۵

شکل ۴-۷ Spallation..... ۵۶

شکل ۴-۸ واپاشی هسته اورانیوم 253 ۵۶

شکل ۴-۹ Photodisintegration..... ۵۸

شکل ۴-۱۰ طیف نوترینوهای به‌غایت پر انرژی در اثر انتشار هسته‌های مختلف هلیوم، کربن، اکسیژن، نئون، کلسیم، کروم (خالص) با بیشینه انرژی 10^{22} eV و شاخص طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۶۱

شکل ۴-۱۱ طیف نوترینوهای کیهانی در اثر انتشار پروتون‌ها و هسته‌های آهن به‌غایت پر انرژی با بیشینه انرژی 10^{22} eV و شاخص طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۶۲

شکل ۴-۱۲ طیف نوترینوهای کیهانی برای منابع با ساختار هلیوم، نیتروژن، اکسیژن، نئون، کلسیم، کروم (خالص) با بیشینه انرژی 10^{22} eV و شاخص‌های طیفی ۲ و $2/6$ برای شبیه‌سازی سه‌بعدی..... ۶۴

شکل ۴-۱۳ طیف نوترینوهای به‌غایت پر انرژی در اثر انتشار پروتون‌های خالص با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی..... ۶۵

شکل ۴-۱۴ طیف نوترینوهای به‌غایت پر انرژی در اثر انتشار هسته‌های آهن با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی..... ۶۶

شکل ۴-۱۵ طیف نوترینوهای به‌غایت پر انرژی در اثر انتشار هسته‌های مختلف هلیوم، کربن، اکسیژن، نئون، کلسیم، کروم (خالص) با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص طیفی ۲/۶ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۶۸

شکل ۴-۱۶ طیف نوترینوهای کیهانی در اثر انتشار پروتون‌ها و هسته‌های آهن با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص‌های طیفی ۲ و ۲/۶ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۶۹

شکل ۴-۱۷ طیف نوترینوهای کیهانی در اثر انتشار پروتون‌ها و هسته‌های آهن با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص‌های طیفی ۲ و ۲/۶ برای شبیه‌سازی سه‌بعدی..... ۶۹

شکل ۴-۱۸ طیف هادرون‌های ثانویه در اثر انتشار هسته‌های مختلف هلیوم، کربن، اکسیژن، نئون، کلسیم، کروم (خالص) با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۷۱

شکل ۴-۱۹ طیف پرتوهای کیهانی به‌غایت پر انرژی در اثر انتشار پروتون‌ها و هسته‌های آهن با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۷۲

شکل ۴-۲۰ طیف هادرون‌های ثانویه در اثر انتشار هسته‌های مختلف هلیوم، کربن، اکسیژن، نئون، کلسیم، کروم (خالص) با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص‌های طیفی ۲ و ۲/۶ برای شبیه‌سازی سه‌بعدی..... ۷۴

شکل ۴-۲۱ طیف هادرون‌های ثانویه در اثر انتشار پروتون‌ها با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص‌های طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی..... ۷۵

شکل ۴-۲۲ طیف هادرون‌های ثانویه در اثر انتشار هسته‌های آهن با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص‌های طیفی ۲ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی و سه‌بعدی..... ۷۵

شکل ۴-۲۳ طیف هادرون‌های ثانویه در اثر انتشار هسته‌های مختلف هلیوم، کربن، اکسیژن، نئون، کلسیم، کروم (خالص) با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص طیفی ۲/۶ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۷۶

شکل ۴-۲۴ طیف پروتون‌های به‌غایت پر انرژی و طیف هادرون‌های ثانویه در اثر انتشار هسته‌های آهن با بیشینه انرژی eV $10^{22} \times A$ و شاخص‌های طیفی ۲ و ۲/۶ برای شبیه‌سازی یک‌بعدی..... ۷۷

شکل ۴-۲۵ طیف پروتون‌های به‌غایت پرنرژی و طیف هادرون‌های ثانویه در اثر انتشار هسته‌های آهن با
بیشینه انرژی $10^{22} \text{ eV} \times A$ و شاخص‌های طیفی ۲ و ۲/۶ برای شبیه‌سازی سه‌بعدی.....۷۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۳ نمونه‌ای از فایل ورودی برنامه شبیه‌سازی سی آر پروپا..... ۳۵
- جدول ۲-۳ نمونه‌ای از فایل خروجی برنامه شبیه‌سازی سی آر پروپا با فرمت ASCII..... ۳۷

فصل اول

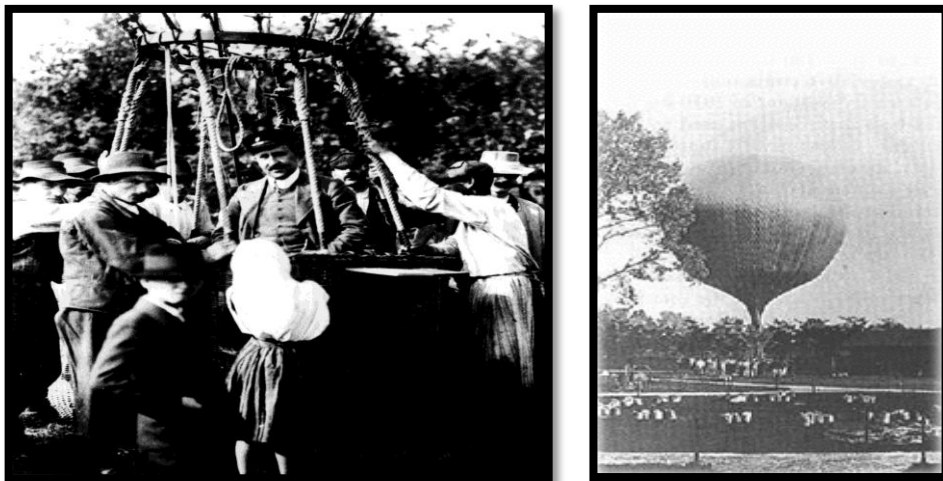
پرتوهای کیهانی

۱-۱ کشف پرتوهای کیهانی

بعد از کشف مواد رادیواکتیویته در دهه ۱۹۰۰ توسط هنری بکرل^۱، دانشمندان متوجه یک رخداد غیر عادی شدند. آن‌ها مشاهده کردند که الکتروسکوپ باردار بدون حضور ماده‌ی رادیواکتیو در مجاورت آن، دچار تخلیه ناگهانی می‌شود. زمانی که ورقه‌ی طلای الکتروسکوپ باردار می‌شود، ورقه‌های آن که با یک میله‌ی کوارتز به یکدیگر متصل شده‌اند از یکدیگر دور شده و پس از مدت کوتاهی دچار تخلیه‌ی بار می‌شوند و مجدداً به یکدیگر می‌چسبند. هر اندازه بار جمع شده روی ورقه‌های طلا بیشتر باشد جداشدگی آن‌ها نیز بیشتر خواهد شد. تابشی که باعث تخلیه‌ی الکتروسکوپ می‌شد تابش زمینه نام گرفت ولی منشأ آن معلوم نبود.

¹ Henri Becquerel

ابتدا تصور می‌کردند این رخداد به علت تشعشعات حاصل از مواد رادیواکتیو داخل زمین است. اولین آزمایشی که برای بررسی این پدیده انجام شد، توسط ویکتور هس^۱، دانشمند اتریشی در سال ۱۹۱۲ صورت گرفت. هس برای بررسی درستی این ادعا چند الکتروسکوپ را در داخل یک بالن قرار داد. خود او به همراه دو تن دیگر نیز در این بالن حضور داشتند و بالن تا ارتفاع ۵ کیلومتری سطح زمین به پرواز درآمد [۱].



شکل ۱-۱- تصویری از ویکتور هس، کاشف پرتوهای کیهانی

هس انتظار داشت که با افزایش ارتفاع بالن، آهنگ تخلیه‌ی الکتروسکوپ کاهش یابد. تا ارتفاع ۷۰۰ متری از سطح زمین این انتظار برآورده می‌شد، ولی با افزایش ارتفاع آهنگ تخلیه به شدت افزایش می‌یافت و این نشان می‌داد که فرض اولیه نادرست است و منشأ اصلی این تخلیه فرازمینی است که هس این تابش‌های فرازمینی را تابش از بالا نام نهاد. درحقیقت می‌توان گفت که این آزمایش تولدی برای شاخه‌ی جدیدی از فیزیک یا همان پرتوهای کیهانی بود.

یافته‌ی اخیر مستلزم بررسی‌های بیشتر بود. پس از هس، ورنر کولهورستر آلمانی^۲، همان آزمایش را در سال‌های ۱۹۱۳-۱۹۱۹ تا ارتفاع ۹ کیلومتری انجام داد. نتایج حاصل از این آزمایش نیز کار هس را تأیید کرد. میلیکان^۳، فرضیه‌ی هس را قبول نداشت و آزمایشاتی برای رد ادعای او انجام داد. او از سال ۱۹۲۳ تا ۱۹۲۶ تعداد زیادی آزمایش در زیر آب و در ارتفاعات بالا انجام داد. آزمایشات میلیکان نیز بر خلاف نظرش، فرض هس را تأیید کرد. میلیکان نام پرتوهای کیهانی را به جای تابش از بالا انتخاب کرد.

¹ Victor Hess

² Werner Kolhorster

³ Robert Andrews Millikan

در سال ۱۹۳۲ کارل اندرسون^۱ از روی رد پرتوهای کیهانی در اتاقک بخار، موفق به کشف پوزیترون شد. به این ترتیب در سال ۱۹۳۶ هس برای کشف ذراتی که "پرتوهای کیهانی نامیده شدند" و اندرسون برای کشف "پوزیترون" جایزه نوبل دریافت کردند[۲].

پس از آن در سال ۱۹۳۷ اندرسون و ندرمایر^۲ با مشاهده تغییر شار ذرات کیهانی در ارتفاعهای مختلف، حضور ذره‌ی بنیادی دیگری به نام میون را به اثبات رساندند. میون ذره‌ای ناپایدار با نیمه عمر واپاشی حدود ۲/۲ میکروثانیه است که سطح مقطع برهم‌کنش کمی با دیگر هسته‌ها دارد. پوزیترون و میون اولین ذرات بنیادی بودند که در آزمایش‌های پرتوهای کیهانی کشف شدند. کشف این ذرات منجر به تولد فیزیک ذرات بنیادی شد. در سال ۱۹۳۹ پی‌یر اوژ^۳ بهمین‌های گسترده‌ی هوایی را با استفاده از آشکارسازهای جدا از هم کشف کرد. او رویدادهای هم‌زمان را در آشکارسازهای مجزا مشاهده نمود و بنابراین نتیجه گرفت که ذرات اولیه‌ی پرتوهای کیهانی در برهم‌کنش با مولکول‌ها و اتم‌های جو زمین یک بهمین گسترده‌ی هوایی را به وجود می‌آورند. پس از آن، دسته‌ای از آزمایش‌ها در سال ۱۹۴۷ منجر به کشف پایون شد. این ذره به طور مستقیم در طی اندرکنش‌های هسته‌ای پرانرژی به وجود می‌آید و واپاشی آن‌ها منجر به تولید میون‌ها می‌شود. همچنین در سال ۱۹۴۸ آزمایشی توسط ون‌آلن^۴ و گاتلیب^۵ طراحی شد که در آن از بالن‌هایی حامل امولسیون هسته‌ای استفاده شده بود. نتیجه‌ی حاصل از این آزمایش بدست آوردن ترکیب ذرات اولیه‌ی کیهانی بود. اکنون مشخص شده است که پرتوهای کیهانی متشکل از انواع گوناگونی از ذرات باردار مثل پروتون‌ها، الکترون‌ها و هسته‌های اتمی کاملاً یونیده هستند.

از آن زمان تاکنون جنبه‌های متفاوتی از پرتوهای کیهانی بررسی و کشف شده است. انرژی ذرات اولیه گسترده‌ی وسیعی در حدود ۱۱ مرتبه‌ی بزرگی از 10^6 eV الکترون ولت تا 10^{20} eV الکترون ولت را می‌پوشاند. ولی هنوز سؤالات بنیادی‌ای وجود دارد که پاسخی برای آن‌ها یافت نشده است. مثلاً نوع چشمه‌های ایجاد کننده‌ی پرتوهای کیهانی، سازوکارهای شتاب‌گیری ذرات تا این انرژی‌های بالا.

تا دهه‌ی ۱۹۵۰ که اولین شتابدهنده‌ها برای فیزیک ذرات بنیادی ساخته شد، از پرتوهای کیهانی به-عنوان آزمایشگاه فیزیک ذرات بنیادی استفاده می‌شد.

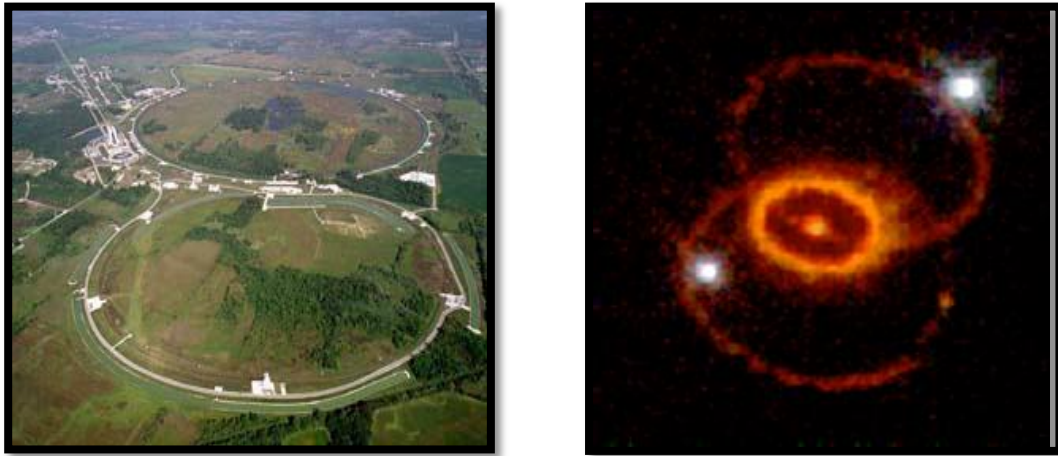
¹ Carl David anderson

² Neddermeyer

³ Auger

⁴ Van Alen

⁵ Gottlieb



شکل ۱-۲ شتابدهنده‌ی طبیعی SN1987A و شتابدهنده‌ی ساخته دست انسان

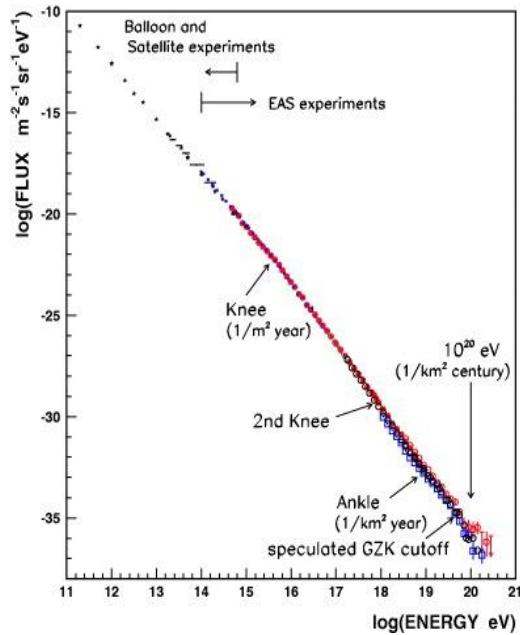
۲-۱ طیف پرتوهای کیهانی

هدف اصلی از مطالعه‌ی پرتوهای کیهانی در نیم قرن گذشته، بدست آوردن دقیق طیف انرژی و ترکیب پرتوهای کیهانی در بازه‌های مختلف انرژی بوده است. اهمیت این امر در آن است که نوع ذرات اولیه، اطلاعاتی از ماهیت و نوع چشمه‌ای که این ذرات در آن تولید شده‌اند و همین طور سازوکار تولید هسته‌های مختلف در انرژی‌های زیاد را به ما می‌دهند. از زمان کشف پرتوهای کیهانی، آزمایش‌های متعددی طیف انرژی آن‌ها را اندازه‌گیری کرده‌اند. شار پرتوهای کیهانی اندازه‌گیری شده در تمام جهات یکسان است یعنی مستقل از زاویه‌ی فضایی و همسانگرد است و با افزایش انرژی، شار پرتوها به صورت نمایی کاهش می‌یابد. تابش کیهانی محدوده بزرگی از انرژی را در بر می‌گیرد. کم انرژی ترین این ذرات کمتر از 10^6 eV و پر انرژی ترین آن‌ها بیش از 10^{20} eV هستند. در شکل ۱-۳ طیف شار پرتوهای کیهانی بر حسب انرژی ذره، نشان داده شده است. طیف انرژی به صورت یک قانون توانی نشان داده می‌شود:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\alpha} \quad (1.1)$$

که در آن شاخص طیفی α ، در محدوده‌ی $2/5$ تا $3/2$ قرار دارد. تا محدوده‌ی انرژی‌های کمتر از TeV 10^6 ، چون ذرات دارای انرژی کمی هستند، از طریق میدان مغناطیسی زمین و بادهای خورشیدی منحرف شده و به بیرون پرتاب می‌شوند و به جو زمین نمی‌رسند از این رو مشاهده‌ی مستقیم آن‌ها از سطح زمین غیر ممکن است و می‌توان آن‌ها را به طور مستقیم در آشکارسازهایی که روی بالن یا ماهواره سوار هستند، مشاهده کرد. اما در انرژی‌های بالاتر شار آنقدر کم می‌شود که نمی‌توان پرتوهای کیهانی را به طور مستقیم

مشاهده کرد. بنابراین محققان این پرتوها را به طور غیر مستقیم با اندازه‌گیری بهمن‌های گسترده هوایی تولید شده توسط آن‌ها اندازه‌گیری می‌کنند. این آزمایش‌های زمینی از جو زمین به عنوان محیط آشکارسازی استفاده می‌کنند و بنابراین در مقایسه با آزمایش‌های سوار بر بالن یا ماهواره، مساحت آشکارسازی به مقدار چشمگیری افزایش می‌یابد.



شکل ۱-۳ طیف انرژی پرتوهای کیهانی

در شکل ۱-۳ دیده می‌شود که طیف انرژی در اطراف 10^{15} eV دچار شکستگی می‌شود، شیب از ۲/۷ به ۳/۱ می‌رسد، یعنی شیب زیاد می‌شود، به این معنا که تعداد ذرات در این انرژی‌ها کاهش می‌یابد به طوری که مقدار آن به یک ذره در هر متر مربع در هر سال می‌رسد. به این ناحیه زانو^۱ی طیف گفته می‌شود که اولین بار در ۱۹۵۸ کشف شد [۳]، محتمل‌ترین منابع برای چنین ذراتی، درون کهکشانی هستند و می‌توانند باقیمانده‌ی انفجار ابرنواختری باشند [۴]. وجود زانوی دوم در انرژی‌های حدود 4×10^{17} eV بر مبنای برخی آزمایش‌ها پیشنهاد شده است [۵، ۶، ۷، ۸]. در این آزمایش‌ها شاخص طیفی از ۳/۰ به ۳/۳ تغییر می‌کند. از طرف دیگر برخی از آزمایش‌های دیگر چنین تغییری را در طیف انرژی ذرات مشاهده نکردند [۹، ۱۰] بنابراین وجود این ساختار طیف تأیید نشده است.

در انرژی‌های اطراف 10^{18} eV طیف دوباره دچار یک تغییر ناگهانی می‌شود و شیب آن بار دیگر به ۲/۷ می‌رسد، به این ناحیه از طیف قوزک^۲ گفته می‌شود. شار ذرات رسیده در این ناحیه بسیار بسیار کم است

^۱ Knee

^۲ Ankle

و به یک ذره در هر کیلومتر در یک قرن کاهش می‌یابد. منشأ این تغییر شاخص طیف را می‌توان با گذار از پرتوهای کیهانی کهکشانی به پرتوهای کیهانی فراکاهشانی توضیح داد. سرانجام آخرین جنبه‌ی طیف انرژی توسط گرایزن، زاتسپین و کازمین^۱ پیش بینی شده است [۱۱،۱۲]. در انرژی‌های بیش از 5×10^{19} eV پروتون‌های بسیار بسیار پر انرژی با تابش ریزموج زمینه‌ی کیهانی^۲ برهم کنش می‌کنند و ویژگی‌ای به نام انرژی قطع GZK را ایجاد می‌کند. هنوز مشخص نیست که آیا چنین ویژگی-ای در طیف وجود دارد یا خیر؟ در اندازه‌گیری‌های آگاسا^۳ [۱۰] کاهش شار پرتوهای کیهانی اولیه تا انرژی-های حدود 10^{20} eV مشاهده نشده است که دلالت بر عدم وجود چنین خط برشی دارد. ولی نتایج هاپرس^۴ [۱۳]، وجود چنین خط برشی را در انرژی‌های حدود 5×10^{19} eV تأیید می‌کند. ولی هنوز این موضوع بحث برانگیز است و توافقی در مورد آن وجود ندارد.

۳-۱ ترکیبات پرتوهای کیهانی

به طور قطع سنجش و پیدا کردن ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی، کمک زیادی را در پاسخگویی به سؤالات رایج درباره منشأ پرتوهای کیهانی خواهد کرد. همچنین برای یافتن دلایل وجود ویژگی‌هایی چون زانو، قوزک و انرژی قطع در طیف پرتوکیهانی، سرنخ خوبی خواهد بود. تا انرژی 10^{13} eV ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی مستقیماً توسط ماهواره‌ها و بالن‌ها تعیین می‌شود و دیده شده که ترکیب جرمی در این ناحیه همان ترکیب جرمی ماده بین ستاره‌ای است (۹۰٪ هیدروژن و ۱۰٪ هلیوم). در شکل ۱-۴ فراوانی نسبی عناصر مختلف در منظومه‌ی شمسی در مقایسه با فراوانی نسبی آن‌ها در تابش کیهانی آمده است [۱۴،۱۵،۱۶]. همه‌ی فراوانی‌ها به فراوانی سیلیکون به‌هنجار شده است. فراوانی‌ها در منظومه‌ی شمسی و در تابش کیهانی در توافق خوبی هستند، اما ناسازگاری‌هایی نیز وجود دارد:

اول اینکه دو گروه از عناصر لیتیوم (Li)، برلیوم (Be) و بور (Br) در بین عناصر سبک و اسکاندیم (Sc)، تیتانیم (Ti)، وانادیم (V)، کروم (Cr) و منیزیم (Mn) در بین عناصر سنگین‌تر در پرتوهای کیهانی فراوانی بسیار بیشتری در مقایسه با ترکیبات منظومه‌ی شمسی دارند. در طی فرآیندهای هسته‌ای آهنگ تولید این عناصر بسیار کم است. این عناصر حاصل شکافت گروه CNO (کربن، نیتروژن و اکسیژن) در عناصر سبک و گروه آهن برای عناصر سنگین در هنگام برخورد با محیط بین ستاره‌ای هستند.

¹ Greisen, Zatsepin and Kuzmin (GZK)

² Cosmic Microwave Background (CMB)

³ AGASA

⁴ HiRes (High Resolution Fly's Eye Cosmic Ray Detector)