

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند

دانشکده علوم

گروه فیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد فیزیک هسته ای

عنوان پایان نامه:

شبیه سازی آشکارساز پرتوهای کیهانی با استفاده از کد GEANT4

استاد راهنما:

دکتر محمد مهدی فیروز آبادی

نگارش:

هادی ظریف

دی ماه ۱۳۹۰

کلیه مزایا اعم از چاپ و تکثیر، نسخه برداری، ترجمه و اقتباس از پایان نامه کارشناسی ارشد برای دانشگاه بیرجند محفوظ می‌باشد. نقل مطالب با ذکر منبع بلامانع است.

تقدیم به روان پاک پدرم

و تقدیم به همسر

که مهربانی، شکیبایی و فداکاری را به من آموخت

سپاسگزاری

اکنون که با عنایت خداوند این رساله به پایان رسیده است لازم می دانم مراتب سپاسگزاری خود از استاد ارجمند جناب آقای دکتر محمد مهدی فیروز آبادی که راهنمایی من را در نگارش این پایان نامه به عهده داشته اند ابراز نمایم. همچنین از اساتید گرامی آقایان دکتر حسین فراشباهی مسجد و دکتر غلامرضا مکتب داران که داوری پایان نامه را به عهده داشته اند کمال تشکر را دارم.

چکیده

شبیه سازی آشکار ساز پرتوهای کیهانی با استفاده از کد GEANT4

نگارش

هادی ظریف

پرتوهای کیهانی به دلیل انرژی های بسیار بالایی که دارند همواره در حوزه ی فیزیک ذرات پر انرژی مورد توجه بوده اند. پس از کشف تابش زمینه کیهانی محاسبات نظری امکان گذار ذراتی با انرژی آستانه 10^{20} eV از فضای میان ستاره ای را رد می کرد. در یک دهه اخیر با ساخت آشکار سازهای بزرگ پرتو های کیهانی، ذراتی با انرژی فراتر از 10^{20} eV که به ناحیه ی قطع GZK موسوم است مشاهده شده اند. به دلیل شار بسیار پایین این ذرات فوق پرانرژی، تنها راه مشاهده ی آنها مطالعه ی چگونگی گسترش بارشهای ذرات ثانویه ی حاصل از آنها در جو زمین است. برای تعیین انرژی و نوع این ذرات لازم است توزیع ذرات ثانویه حاصل از بارش هوایی با نتایج حاصل از شبیه سازی کامپیوتری برهمکنش ذرات مختلف با جو زمین مقایسه شود. در این پایان نامه با استفاده از کد مونت کارلوی GEANT4 برهمکنش پروتون های فوق پرانرژی با جو زمین در ناحیه قطع GZK شبیه سازی شده است و توزیع طولی و جانبی پرتو های گاما، الکترون ها و میونهای حاصل از این برهمکنش ها تعیین شده است.

کلمات کلیدی: پرتو های کیهانی – بارشهای جوی – ناحیه قطع GZK – کد GEANT4

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

فصل اول: آشنایی با پرتوهای کیهانی

۱	۱-۱ مقدمه
۲	۲-۱ تعریف پرتوهای کیهانی
۲	۳-۱ تاریخچه مطالعه ی پرتوهای کیهانی
۶	۴-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی
۸	۵-۱ موضوعات اصلی در تحقیقات پرتوهای کیهانی
۹	۶-۱ تولید پرتوهای کیهانی
۹	۱-۶-۱ انرژی ستاره ای
۱۱	۲-۶-۱ تحولات ستاره ای
۱۱	۳-۶-۱ نوترینوهای ابر نواختر
۱۳	۴-۶-۱ دو تعریف مهم
۱۳	۵-۶-۱ تشکیل ترکیبهای شیمیایی
۱۶	۷-۱ پرتوهای گامای کیهانی
۱۷	۱-۷-۱ طیف انرژی پرتوی گاما از کهکشان مرکزی
۱۸	۲-۷-۱ پرتوهای کیهانی بالای اتمسفر
۱۸	۳-۷-۱ مدولاسیون خورشیدی
۱۹	۴-۷-۱ آثار میدان مغناطیسی زمین
۲۰	۸-۱ طیف و ترکیب پرتوهای کیهانی
۲۲	۹-۱ طیف انرژی مولفه های مختلف پرتوهای کیهانی
۲۴	۱-۹-۱ طیف الکترون
۲۵	۲-۹-۱ آنتی پروتون ها
۲۶	۱۰-۱ پرتوهای کیهانی در جو زمین
۲۷	۱-۱۰-۱ ساختار جو
۲۸	۱۱-۱ تقریبهای تحلیلی
۳۰	۱۲-۱ پرتوهای کیهانی زیر زمین

فصل دوم: برهمکنشهای پرتوهای کیهانی با ماده

۳۱	۱-۲ دسته بندی برهمکنشها
۳۲	۲-۱-۲ برهمکنشهای الکترومغناطیسی در ماده
۳۲	۱-۲-۱-۲ پراکندگی کولنی
۳۳	۲-۲-۱-۲ یونیزاسیون
۳۴	۳-۲-۱-۲ تابش چرنکوف
۳۴	۴-۲-۱-۲ پراکندگی کامپتون
۳۶	۵-۲-۱-۲ تابش ترمزی
۳۷	۶-۲-۱-۲ تولید زوج
۳۸	۷-۲-۱-۲ تابش سینکروترون
۳۹	۸-۱-۲ اثر کامپتون معکوس
۴۰	۳-۱-۲ برهمکنشهای هادرونی ناکشسان زیر 1000 GeV
۴۱	۴-۱-۲ ترکش هسته ای
۴۴	۲-۲ بارش های پرتوهای کیهانی
۴۴	۱-۲-۲ بارش های الکترومغناطیس
۴۵	۱-۱-۲-۲ نظریه آبشار الکترومغناطیسی
۴۸	۲-۲-۲ بارش های هادرونی
۵۳	۳-۲ آشکارسازی بارش های هوایی
۵۴	۱-۳-۲ توزیع جانبی ذرات بارش
۵۶	۲-۳-۲ مخزن های چرنکوف آب
۵۶	۳-۳-۲ آشکارسازهای چرنکوف
۵۷	۴-۳-۲ آشکارسازهای فلورسنت
۵۸	۴-۲ انتهای طیف پرتو کیهانی
۵۹	۱-۴-۲ برهمکنشهای UHECR با تابش زمینه ریز موج
۶۱	۵-۲ پراکندگی هسته های (UHE)
۶۲	۶-۲ نتایج آزمایشگاهی و فعالیتهای جاری
۶۶	۷-۲ چالشهای پیش رو در پرتوهای کیهانی پر انرژی

فصل سوم: روش و مدل‌های شبیه سازی برهمکنش پرتوهای کیهانی در جو

۶۸	۱-۳ کد شبیه سازی Geant4
۶۹	۲-۳ روش مونت کارلو
۷۰	۱-۳-۳ برنامه سازی شی گرا
۷۱	۲-۳-۳ دسته بندی کلاسها در Geant4
۷۳	۳-۳-۳ ردیابی
۷۳	۴-۳-۳ دستیابی به اطلاعات مسیر و گام
۷۴	۴-۳ فرایندهای فیزیکی
۷۵	۱-۴-۳ برهمکنشهای الکترومغناطیسی
۷۵	۲-۴-۳ برهمکنشهای هادرونی
۷۵	۱-۲-۴-۳ بانکهای داده سطح مقطع
۷۵	۲-۲-۴-۳ سطح مقطع های پیش فرض
۷۶	۳-۲-۴-۳ سطح مقطع های تراگذر نوترون های کم انرژی
۷۶	۳-۴-۳ هادرون ها در حالت سکون
۷۶	۴-۴-۳ هادرون ها در حرکت
۷۷	۵-۴-۳ جدول واپاشی ذرات
۷۸	۶-۴-۳ فرآیندهای فوتون مرئی
۸۰	۵-۳ ذرات
۸۰	۱-۵-۳ دسته بندی ذرات در Geant4
۸۰	۱-۱-۵-۳ ذرات بنیادی
۸۱	۲-۱-۵-۳ هسته ها
۸۱	۳-۱-۵-۳ ذرات کوتاه عمر
۸۱	۶-۳ آستانه تولید و قطع ردیابی (Tracking CUT)
۸۲	۷-۳ دسته بندی مدلها در Geant4
۸۲	۱-۷-۳ مدلهای تئوری
۸۲	۱-۱-۷-۳ مدل آبشار درون هسته ای
۸۳	۲-۱-۷-۳ مدل آبشار دوتایی
۸۴	۳-۱-۷-۳ مدل تئوری FTF
۸۴	۴-۱-۷-۳ مدل FTFP
۸۴	۴-۱-۷-۳ مدل CHIPS
۸۵	۱-۴-۱-۷-۳ مفاهیم اساسی مدل CHIPS
۸۵	۲-۴-۱-۷-۳ کواسمون

۸۵	۳-۷-۱-۴-۳ همجوشی کواریکی
۸۶	۳-۷-۱-۵ مدل QGSP
۸۶	۳-۷-۱-۶ مدل‌های ترکیبی
۸۶	۳-۷-۲ مدل‌های تجربی
۸۷	۳-۷-۳ مدل‌های پارامتری
۸۷	۳-۸ اعتبار مدل‌های برهمکنش هادرونی

فصل چهارم: شبیه سازی بارش های هوایی در اتمسفر با استفاده از کد مونت کارلوی Geant4

۹۱	۴-۱ تعریف هندسه اتمسفر
۹۵	۴-۲ تعریف ذره فرودی
۹۵	۴-۳ تعریف فیزیک برهمکنش ها
۹۶	۴-۳-۱ مدل‌های برهمکنش مورد استفاده در شبیه سازی
۹۶	۴-۳-۲ انتخاب مدل مناسب برای برهمکنش
۹۹	۴-۴ استخراج و پردازش نتایج شبیه سازی
۱۰۱	۴-۵ گسترش طولی بارش های هوایی
۱۰۴	۴-۶ توزیع جانبی بارش های هوایی
۱۰۴	۴-۶-۱ توزیع جانبی بارش در انرژی های بسیار بالا
۱۰۵	۴-۶-۱-۲ توزیع جانبی فوتون های حاصل از برخورد پروتون 10^{19} GeV با جو
۱۰۶	۴-۶-۱-۳ توزیع جانبی الکترون های حاصل از برخورد پروتون 10^{19} GeV با جو
۱۰۷	۴-۶-۱-۴ توزیع جانبی پوزیترون های حاصل از برخورد پروتون 10^{19} GeV با جو
۱۰۸	۴-۶-۱-۵ توزیع جانبی میون های حاصل از برخورد 10^{19} GeV با جو
۱۰۹	۴-۶-۱-۵ توزیع جانبی الکترون، فوتون ها و میون های منفی
۱۱۱	۴-۷ نتایج و پیشنهادها

فهرست جدول ها

شماره و عنوان	صفحه
۱-۲ برهمکنش ها و ذرات بنیادی	۳۱
۲-۲ مقادیر پارامتر برای عناصر مهم پرتوهای کیهانی	۳۳
۳-۲ انرژی های آستانه برای گسیل ترکیب های متفاوت نوکلئون ها	۶۱
۴-۲ آشکارسازهای بارش هوایی بزرگ	۶۵
۱-۳ کلاسهای برهمکنشهای هادرونیهای متحرک در Geant4	۷۷
۱-۴ تغییرات دما، فشار و چگالی هوا بر حسب ارتفاع از سطح زمین	۹۱
۲-۴ مقایسه ضریب تکثیر برای چند ذره در برهمکنش پروتون 100 GeV با جو	۹۷
۳-۴ فاصله مکان بیشینه از مرکز بارش برای پروتون های 10^{19} eV و 10^{20} eV	۱۱۰

فهرست شکل ها

شماره و عنوان	صفحه
۱-۱ یونیزاسیون بر حسب عمق اتمسفر	۳
۲-۱ طیف انرژی هسته های پرتوهای کیهانی بالای ۱۰۰ GeV	۷
۳-۱ نمودار انرژی-زمان نوترینوهای آشکار شده توسط Kamiokande	۱۲
۴-۱ طیف انرژی نوترینوهای ابرنواختر	۱۳
۵-۱ نسبت شار هسته بور ثانویه به کربن اولیه	۱۴
۶-۱ تغییر شکل طیف انرژی هسته پس از انتشار	۱۵
۷-۱ سهم تولید پرتوی گاما توسط ذرات مختلف	۱۷
۸-۱ بهترین برازش برای داده های اگریت از انتشار گامای زمینه	۱۷
۹-۱ میانگین ماهانه شمارش مونیتورهای نوترون	۱۹
۱۰-۱ فراوانی نسبی عناصر پرتو کیهانی به صورت تابعی از عدد اتمی عنصر	۲۰
۱۱-۱ طیف انرژی پرتوهای کیهانی در پنج گروه جرمی	۲۱
۱۲-۱ مقایسه چند مجموعه ی داده مربوط به هیدروژن	۲۳
۱۳-۱ مقایسه چند مجموعه ی داده مربوط به هلیوم	۲۳
۱۴-۱ شار هسته های با $Z > 17$	۲۴
۱۵-۱ سهم نسبی گروههای مختلف هسته ها در شار کل هسته ها	۲۴
۱۶-۱ شار کل الکترون (مجموع شار الکترون و پوزیترون) روی جو	۲۵
۱۷-۱ نتایج دو اندازه گیری جدید برای نسبت شار پوزیترون به الکترون	۲۵
۱۸-۱ شار پاد پروتون آشکار سازی شده	۲۶
۱۹-۱ نمودار تغییرات دمایی جو بر حسب ارتفاع	۲۸
۲۰-۱ شار پیون در اتمسفر	۳۰
۱-۲ سطح مقطع های پراکندگی کامپتون به صورت تابعی از انرژی فوتون	۳۵
۲-۲ سطح مقطع ناکشسان پراکندگی PP در اندازه گیری های مستقیم شتابدهنده	۴۰
۳-۲ تکثیر بار میانگین	۴۱
۴-۲ توزیع جرم پاره ها در برخورد آهن با هدف کربن	۴۳
۵-۲ مدل ساده ی هیتلر برای گسترش بارش	۴۵

- ۶-۲ پروفایل های بارش الکترون در برهمکنش فوتون ها با جو ۴۷
- ۷-۲ پروفایل های بارش میانگین حاصل از پروتون و فوتون ۴۹
- ۸-۲ مقایسه پروفایل ۱۰ بارش با پروفایل متوسط بارش عمودی پروتون 10^5 GeV ۵۱
- ۹-۲ مقایسه عمق بیشینه پروفایل بارشها ۵۱
- ۱۰-۲ تعداد متوسط میونها در سطح دریا در بارش عمودی پروتون ۵۳
- ۱۱-۲ طرحی ساده از یک بارش و آشکارساز ۵۴
- ۱۲-۲ طرح یک بارش در آرایه ای از ۱۹۶ آشکارساز ۵۵
- ۱۴-۲ توزیع جانبی تابش چرنکوف در بارش پروتونهای 10^7 GeV در سطح دریا ۵۶
- ۱۵-۲ تصویری از یک بارش که توسط آشکارساز فلورسنت ۵۸
- ۱۶-۲ چگالی انرژی ریزموج زمینه کیهانی ۵۹
- ۱۷-۲ وابستگی سطح مقطع کل تولید فوتون به انرژی در چارچوب هسته ساکن ۶۰
- ۱۸-۲ فاصله کاهش انرژی برای فروپاشی فوتونی، تولید زوج، تولید فوتون و انبساط بی دررو ۶۲
- ۱۹-۲ پروفایل بارش پرنرژی ترین پرتوهای کیهانی آشکار شده توسط Fly's Eye ۶۴
- ۲۰-۲ نمایی از آشکارساز Auger ۶۵
- ۲۱-۲ طیف انرژی پرتوهای کیهانی ۶۶
- ۲۲-۲ مقایسه پروفایل پرنرژی ترین بارش با بارشهای حاصل از آهن، پروتون و پرتوی گاما ۶۷
- ۱-۳ کلاسها در Geant4 و روابط بین آنها ۷۱
- ۲-۳ پراکندگی کشسان پروتون ۱ GeV در هدف کربن ۱۲ ۸۸
- ۳-۳ پراکندگی کشسان پروتون ۱ GeV در هدف سرب ۲۰۸ ۸۸
- ۴-۳ پراکندگی کشسان پروتون ۳۰۱ GeV در هدف هلیوم ۴ ۸۹
- ۵-۳ طیف جرمی حاصل از بمباران آرسنیک ۷۳ با پروتونهای 380 MeV ۸۹
- ۶-۳ سطح مقطع تولید پیون مثبت در برهمکنش پروتون 730 MeV با هدف کربن ۱۲ ۹۰
- ۱-۴ ترسیم بارش حاصل از برخورد یک پروتون با انرژی 10 GeV ۹۵
- ۲-۴ ذرات ثانویه ی حاصل از برخورد پروتون 1 TeV و 100 GeV با جو ۱۰۰
- ۳-۴ تعداد الکترونها ی ثانویه در برخورد پروتون 1 TeV با هوا در ارتفاع ۰ تا 20 کیلومتر ۱۰۱
- ۴-۴ تعداد الکترونها ی ثانویه در برخورد الکترون 1 TeV با هوا در ارتفاع ۰ تا 20 کیلومتر ۱۰۲
- ۵-۴ تعداد الکترونها ی ثانویه در برخورد گامای 1 TeV با هوا در ارتفاع ۰ تا 20 کیلومتر ۱۰۲
- ۶-۴ تعداد الکترونها ی ثانویه در برخورد گامای 500 GeV با هوا در ارتفاع ۰ تا 20 کیلومتر ۱۰۳
- ۷-۴ توزیع جانبی فوتونهای حاصل از برخورد پروتون 10^{19} eV با جو ۸-۴ ۱۰۵
- ۸-۴ توزیع جانبی الکترون ها حاصل از برخورد پروتون 10^{19} eV با جو ۱۰۶

۱۰۷	۹-۴ توزیع جانبی پوزیترون های حاصل از برخورد پروتون 10^{19} eV با جو
۱۰۸	۱۰-۴ توزیع جانبی میونهای حاصل از برخورد پروتون 10^{19} eV با جو
۱۰۹	۱۱-۴ توزیع جانبی فوتونهای حاصل از برخورد پروتون 10^{20} eV با جو
۱۰۹	۱۲-۴ توزیع جانبی الکترون های حاصل از برخورد پروتون 10^{20} eV با جو
۱۱۰	۱۳-۴ توزیع جانبی میونهای منفی حاصل از برخورد پروتون 10^{20} eV با جو

مقدمه

۱-۱ - هدف تحقیق

حدود ۱۰۰ سال از کشف پرتوهای کیهانی توسط ویکتور هس^۱ می گذرد، با این وجود هنوز تحقیقات در زمینه پرتوهای کیهانی نقش مهمی در توسعه فیزیک هسته ای و فیزیک ذرات در انرژی های بالا دارد. پرتوهای کیهانی از یک سو طیف نسبتاً گسترده ای از ذرات شامل نوترینوها، الکترون ها، پرتوهای گاما، پروتونها و هسته های سنگین تری مانند He، O، N، C و Fe را شامل می شوند و از طرف دیگر گستره ی بزرگی از انرژی ها تا حدود 10^{20} eV را فرا می گیرند. این تنوع در نوع ذرات و انرژی آنها باعث می شود انواع برهمکنش های الکترومغناطیسی و هادرونی در هنگام برخورد آنها با جو زمین مشاهده شوند.

از این جنبه پرتوهای کیهانی همواره آزمایشگاه پر اهمیتی برای فیزیک انرژی های بالا بوده اند. در سالهای اخیر آشکارسازهای بزرگی برای مشاهده این ذرات ساخته شده است که هدف عمده ی آنها بررسی ذرات فوق پر انرژی در حدود 10^{20} eV است که اهمیت نظری خاصی دارند. شناخت ماهیت و منشأ این ذرات می تواند تحول مهمی در فیزیک ذرات پر انرژی به وجود آورد. در حال حاضر وجود ذرات در این محدوده ی انرژی که به ناحیه قطع GZK موسوم است توجیه نظری مناسبی ندارد و یکی از معماهای حوزه ی تحقیقات پرتوهای کیهانی است.

چالش مهم در این زمینه شار بسیار پایین ذرات پرانرژی است که امکان مشاهده مستقیم آنها را در آشکارسازها عملاً از بین می برد. تنها روش عملی، بررسی بارش حاصل از این پرتوها است که به صورت آبخاری از ذرات ثانویه همزمان به سطح زمین می رسند.

از اینجا اهمیت شبیه سازی های کامپیوتری در این تحقیقات روشن می شود. آشکارسازهای بزرگ پرتوهای کیهانی می توانند طیف انرژی و توزیع ذرات ثانویه را در سطح زمین ثبت کنند اما برای تعیین نوع ذره اولیه و انرژی آن اطلاعاتی به دست نمی دهند. برای رسیدن به این اطلاعات لازم است نتایج حاصل از تجربه با نتایج شبیه سازی های کامپیوتری مقایسه شوند و با تطبیق طیف حاصل از محاسبات کامپیوتری برای یک ذره مشخص و با انرژی مشخص با طیف اندازه گیری شده توسط آشکارسازها، نوع و انرژی ذره فرودی تعیین شود.

¹ Victor Hess

در این تحقیق با استفاده از کد مونت کارلوی Geant4 که ابزاری قوی برای شبیه سازی برهمکنشهای ذره با ماده است، برهمکنشهای پرتوهای کیهانی با جو زمین شبیه سازی شده است. در این فصل مقدمه ای بر سیر تحول تحقیقات پرتوهای کیهانی، ماهیت این پرتوها و منشاء آنها ارائه شده است.

۱ - ۲ - تعریف پرتوهای کیهانی

پرتوهای کیهانی اغلب به صورت ذرات بارداری که از فضای میان ستاره ای به زمین می رسند تعریف می شوند در انرژی GeV شار هیدروژن و هلیوم به همه ذرات دیگر غالب است. ترکیب شیمیایی ترکیب شیمیایی پرتوهای کیهانی به هسته های خیلی سنگین نیز گسترش می یابد و کم و بیش همه هسته های پایدار را شامل می شود. علاوه بر اینها شار پایایی از الکترونها نیز در پرتوهای کیهانی یافت می شود. اجزای نادرتری مانند آنتی پروتونها و پوزیترون ها نیز در این ترکیب یافت می شود. ذرات بدون بار شامل پرتوهای کیهانی نمی شوند، چرا که بر اساس تعریف اولیه ما منشاء بین ستاره ای ندارند. با این وجود بررسی ذرات خنثی با منشا خورشیدی به ویژه نوترینوهای خورشیدی اهمیت زیادی دارند، چرا که نشان دهنده فرایندهای تولید انرژی در خورشید هستند.

۱-۳ - تاریخچه مطالعه ی پرتوهای کیهانی

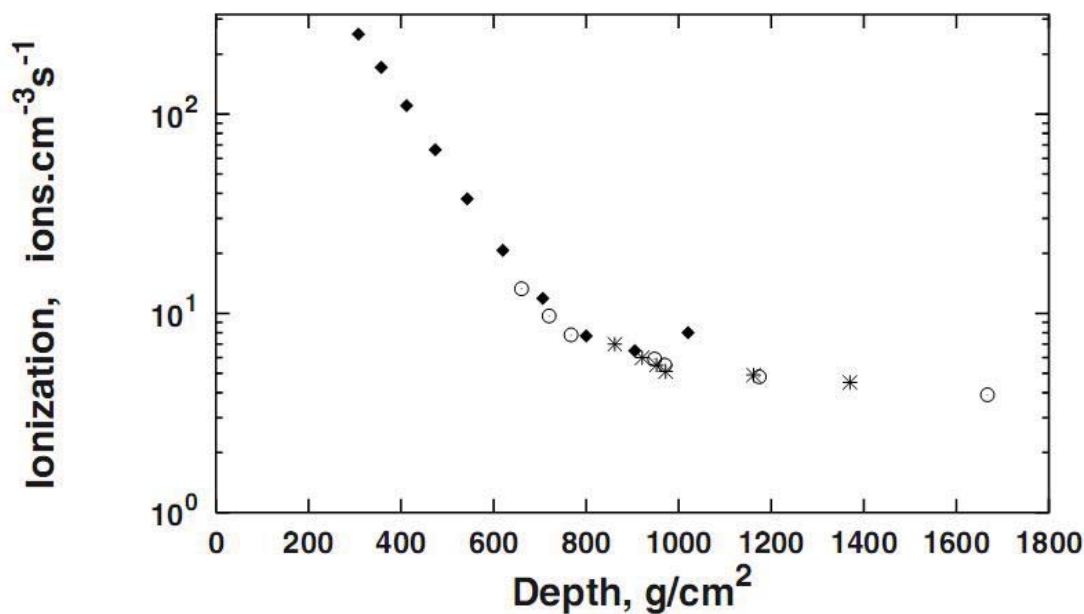
فیزیک پرتوهای کیهانی یک مطالعه میان رشته ای بین اختر فیزیک، فیزیک ذرات پر انرژی و فیزیک پلاسما است. این ویژگی از هنگام کشف پرتوهای کیهانی در ۱۰۰ سال پیش وجود داشته است. در آن زمان تحقیقی که منجر به کشف پرتوهای کیهانی شد کار مشترکی بین دانشجویان فیزیک، علم مواد و محیط زیست بود. پس از کشف رادیواکتیویته این واقعیت مورد توجه قرار گرفت که هوا با آهنگ نسبتا بالایی یونیزه است. اندازه گیریها تولید ۱۰ تا ۲۰ یون بر سانتی متر مکعب بر ثانیه در هوا را نشان می دادند. پرسش اساسی این بود که آیا عامل این یونش هوا رادیواکتیو طبیعی زمین است و یا منشا دیگری دارند.

چون پرتوهای α و β برد محدودی دارند به نظر می آمد تابش γ عامل اصلی باشد. برای بررسی بهتر اندازه گیری یونیزاسیون در ارتفاع های مختلف آغاز شد و از برجهای بلند از جمله برج ایفل استفاده شد. نقطه عطف این تحقیقات وقتی اتفاق افتاد که درست پیش از جنگ اول جهانی ویکتور هس^۱ در استرالیا و کوهل هوستر^۲ در آلمان تصمیم گرفتند از بالون استفاده کنند. در ۱۹۱۲ هس با یک بالون تا ارتفاع

^۱ Victor Hess

^۲ KoehlHoster

۵ Km بالا رفت و ثابت کرد یونیزاسیون نه تنها کاهش نمی یابد بلکه با افزایش ارتفاع به شدت بیشتر می شود. تنها توضیح قابل قبول آن بود که "یک تابش با توان نفوذ زیاد از بالا به اتمسفر می تابد". این سر آغاز کشف پرتوهای کیهانی بود که هس به خاطر آن جایزه نوبل ۱۹۳۶ را دریافت کرد. کوهل هوستر با پرواز تا ارتفاع ۷ Km این نتایج را تایید کرد. پس از جنگ رابطه یونیزاسیون و ارتفاع موضوع اندازه گیری های زیادی شد. مهمترین نقش در این زمینه را میلیکان داشت که به منظور رد نظریات هس و کوهل هوستر آزمایشهایی را ترتیب داد. او تجهیزات آشکار سازی را ارتقا داد و شروع به اندازه گیری یونیزاسیون در عمق دریاچه های کوهستانی کرد. او معتقد بود کل ضخامت جو معادل ۱۰ متر آب است. بنابراین با اندازه گیری در آب بهتر می توان طول نفوذ پرتوهای کیهانی را تعیین کرد. میلیکان نخستین بار نام "پرتوهای کیهانی" را به کار برد و کار او آغازگر اندازه گیری انرژی پرتوهای کیهانی بود. نتایج آزمایشگاهی به او کمکی نکرد چون پرتوهای کیهانی طول جذب متفاوتی در هوا و آب دارند. این نتیجه ای است که اکنون به آسانی قابل درک است. یونیزاسیون در هوا حاصل مولفه الکترومغناطیسی پرتوهای کیهانی است، در حالی که در زیر آب میونهای پر انرژی مهم هستند.



نمودار (۱-۱). یونیزاسیون بر حسب عمق اتمسفر، الماسها نتایج اندازه گیری کوهل هوستر و دایره ها نتایج اندازه گیری های میلیکان زیر آب است. [۱]

طی ۲۰ الی ۳۰ سال بعد تحقیقات این حوزه روی ویژگیهای فیزیک انرژی بالای مربوط به پرتوهای کیهانی تمرکز یافت و بیشتر اکتشافات ذرات جدید تا قبل از ۱۹۵۰ در اندازه گیری بر هم کنشهای پرتوی کیهانی انجام گرفت.

پیشرفت دیگر مرتبط با این حوزه توسعه الکترودینامیک کوانتومی (QED) و نظریه بارش الکترومغناطیسی بود که در پی کشف بارش های حاصل از پرتوهای کیهانی توسط اسکوبلین^۱ در ۱۹۲۰

^۱ Skobelzyn

صورت گرفت. این بارش ها ابتدا به عنوان محصول پراکندگی کامپتون توسط لایه های کیهانی تعبیر شدند. نظریه بر همکنشهای الکترومغناطیسی بزودی تکامل یافت و در ۱۹۴۰ نظریه بارش های الکترومغناطیسی کامل شد.

با پیدا شدن چندین روش برای آشکارسازی مستقیم ذرات بارش، امکان انبوهی از کشفیات جدید فراهم شد. اسکوبلین مسیر بارش را مستقیماً در اتاقک ابر مشاهده کرد. مقدار یونش با اندازه گیری پهنای مسیر معلوم می شد. روش مشابهی با استفاده از توده هایی از ورقه های امولسیون به کار برده شد. علاوه بر این فیزیکدانهای پرتوهای کیهانی روش شمارش ذرات باردار را آموختند. نخستین ابزار موفق کنتور گایگر مولر بود که با عبور ذرات باردار تولید پالس الکتریکی می کرد. شمارنده ها آشکار سازی ذرات را خیلی آسان کردند، هر چند مستقیماً انرژی ذرات را اندازه گیری نمی کردند اما می شد با پوشاندن دهانه آنها با مقدار مشخصی از ماده، آستانه انرژی ذرات فرودی را تعیین کرد. گسترش روشهای آزمایشگاهی امکان پیشرفتهای بزرگی در کشف طبیعت پرتوهای کیهانی را فراهم کرد. شمارنده ها جایگزین الکترومترها شدند و هنگامی که دو شمارنده روی یکدیگر سوار می شدند شمارش یکسانی را نشان می دادند، حتی در شرایطی که بین آنها چندین سانتی متر سرب و طلا قرار داشت. این ثابت می کرد برخی ذرات کیهانی ماهیتی کاملاً متفاوت با پرتوهای گاما دارند.

در آزمایشهای دیگری شمارنده ها در روی یک سطح و دور از هم قرار گرفتند همزمانی بین این شمارنده ها ثابت کرد برخی پرتوهای کیهانی به صورت گروهی (بارش های اتمسفری) به سطح زمین می رسند. اندازه گیری آهنگ همزمانی به صورت تابعی از فاصله بین شمارنده ها و کاربرد نظریه بارشی به این نتیجه انجامید که ذرات اولیه ای که آغازگر بارش اتمسفری هستند دارای انرژی هایی در محدوده 10^6 GeV هستند. طی چندین سال آزمایشهای مبتنی بر امولسیون هسته ای با استفاده از بالون ها در ارتفاع زیاد این نتایج را تایید کردند. مسیر فوتونها و هسته های سنگین تر آشکار شدند و طبیعت پرتو های کیهانی مشخص شد. برای مدتی آزمایشهای پرتوی کیهانی جنبه آزمایشگاهی فیزیک هسته ای را تشکیل می دادند.

در همین زمان شاخه دیگری از تحقیقات پرتوی کیهانی شامل بررسی بر همکنش این پرتوها با میدان مغناطیسی زمین بود. وقتی روشن شد پرتوهای کیهانی شامل هسته های با بار مثبت است به نظر می رسید شار آنها باید به میدان مغناطیسی زمین در محل آزمایش وابسته باشد. این مورد توسط گروههای مختلف در عرضهای جغرافیایی گوناگون تایید شد.

آزمایشهایی از همین نوع باعث کشف اثر غرب - شرق پرتوهای کیهانی شد. میدان مغناطیسی زمین باعث می شود پرتوهای کیهانی از سمت غرب بیشتر از شرق به زمین برسند. ذرات بار دار مثبت که از غرب می آیند به سمت زمین منحرف می شوند در حالی که ذراتی که از شرق می آیند رو به بالا منحرف می شوند. به علت قوی تر بودن میدان زمین، در عرضهای جغرافیایی بالاتر این اثر محسوس تر است. با پیشرفت سریع شتابدهنده های ذرات در سالهای ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ پرتوهای کیهانی جذابتشان را برای فیزیکدانهای انرژی بالا از دست دادند. شتابدهنده ها قادر هستند باریکه هایی پر شدت از ذرات معین با انرژی مشخص تولید کنند. این مزایا باعث شد آزمایشهایی که روزها به طول می انجامید در چند

ساعت انجام شود و امکان آزمایش روی هندسه های دقیق تری از مواد فراهم گردد. شمار اندکی از فیزیکدانها به انرژی هایی فراتر از آنچه شتاب دهنده ها فراهم می کردند توجه نشان دادند و با ساخته شدن شتابدهنده های جدید فیزیکدانهای پرتوهای کیهانی مجبور به گذار به انرژی های بالاتر شدند. از جنبه دیگر امکان شناخت بهتر بر همکنشهای هادرونی و تحلیل داده های پرتوهای کیهانی فراهم گردید و دانشمندان پرتوهای کیهانی روانه آزمایشگاههای شتابدهنده شدند. در همین زمان مطالعه آزمایشگاهی منظومه شمسی منجر به تولد رشته "فیزیک فضا" شد. میدانهای مغناطیسی در جو خورشید و ویژگیهای بادهای خورشید هر بیشتر مورد توجه قرار گرفت. نتایج اندازه گیری پرتوهای کیهانی در نقاط مختلف زمین با نتایج اندازه گیری های شاتل ها و فضاپیماها مقایسه شد و نقش دوره های فعالیت خورشیدی و میزان فعالیت خورشید در آن بررسی شد.

امکان مطالعه مستقیم پرتوهای کیهانی اولیه با استفاده از بالون و ماهواره ها منجر به دانش دقیقی از ترکیب شیمیایی و ایزوتوپی پرتوهای کیهانی گردید. سطح مقطع های بر همکنشهای هسته ای با دقت در آزمایشگاه تعیین شدند و بر پرتوهای کیهانی در طی انتشارشان در فضای بین ستاره ای اعمال شدند. آشکارسازی ایزوتوپهای ناپایدار شناخته شده و مقایسه شار آنها، زمان انتشار پرتوهای کیهانی در کهکشان را به طور مستقل تخمین زد.

در همین زمان نظریه شتاب پرتو کیهانی به سرعت رشد می کرد. چندین مدل در حدود ۱۹۷۰ ارائه شدند که شتاب پرتوهای کیهانی را در شوکهای اختر فیزیکی توصیف می کردند. ترکیب این نتایج موجب تولد "مدل استاندارد پرتوهای کیهانی" گردید. تکامل مدل استاندارد به تدریج ادامه یافت. دو تحول مهم دیگر، یکی آزمایش نوترینوی خورشیدی توسط ری دیویس^۱ در معدن همستیک^۲ و دیگری یافتن نیمه عمر^{۳۰} سال برای پروتون بود.

آزمایشهای زیر زمینی قادر به اندازه گیری آثار مختلفی هستند که یکی از آنها نوسانات نوترینویی است. این واقعیت های مهیج باعث بازگشت بسیاری از فیزیکدانهای ذرات پر انرژی شتابدهنده ها به مسئله پرتوهای کیهانی شد و هنوز هم این موضوع یکی از حوزه های با ارزش آزمایشهای ذرات است.

در حدود سال های ۱۹۸۰، شاید به دلیل گسترش ستارشناسی پرتوهای X و γ ، فیزیکدانهای پرتوهای کیهانی توجه دقیق خود را متوجه منشاء پرتوهای کیهانی کردند. حدس اولیه در مورد گسیل پرتوهای فوق پر انرژی از سیستم دو تایی Cygnus X-3 نقش مثبتی در توسعه این حوزه داشت. اینها با نخستین اندازه گیری های پرتوهای گامای TeV که منجر به ساخت نسل سوم تلسکوپ ها شد همزمان شدند.

طی بیست سال گذشته بسیاری از فیزیکدانان ذرات در مورد منشاء و طبیعت پرتوهای کیهانی بسیار پر انرژی تحقیق کرده اند. شتابدهنده ی بزرگ LHC می تواند انرژی هایی در حدود 10^4 GeV تولید کند، در حالی که ذراتی با انرژی 10^{11} GeV در پرتوهای کیهانی آشکار سازی شده اند.

¹ ReyDevice

² Hemestake

ذرات با چنین انرژی بالایی با فضای فرا کهکشانی بر همکنش دارند و ممکن است توسط میدان های مغناطیسی منحرف شوند در حالی که نوترینوهای پر انرژی مستقیماً از کناره های کیهان بدون انحراف به ما می رسند. هر چند این نوترینوها نادر هستند، آشکار سازی آنها می تواند تحول عظیمی در کیهان شناسی باشد. به این جهت طی ۱۰ تا ۱۵ سال اخیر تلاشهای زیادی انجام شده است و آشکار سازهای بزرگ نوترینویی در هر دو نیمکره ساخته شده است.

۱-۴ - طیف انرژی پرتوهای کیهانی

از کشف پرتوهای کیهانی ۱۰۰ سال می گذرد و هنوز پرسشهای جدی پیرامون منشاء آنها و انرژی بسیار بالای آنها وجود دارد. شکل (۱-۲) طیف انرژی پرتوهای کیهانی را بالای 100 GeV/Nucleon نشان می دهد. نمودار شامل همه هسته های باردار است. انرژی های زیر 100 GeV نشان داده نشده اند چون هرچند آزمایشها در این محدود دقیق هستند اما ابزارها نمی توانند تمام گستره جرمها را پوشش دهند. در این بازه ی انرژی روش معمول، نمایش هسته های با جرم های متفاوت با انرژی جنبشی بر نوکلئون است و تبدیل آنها به انرژی بر نوکلئون با خطای زیادی همراه است. طیف پرتوی کیهانی یک خط هموار موج دار است.