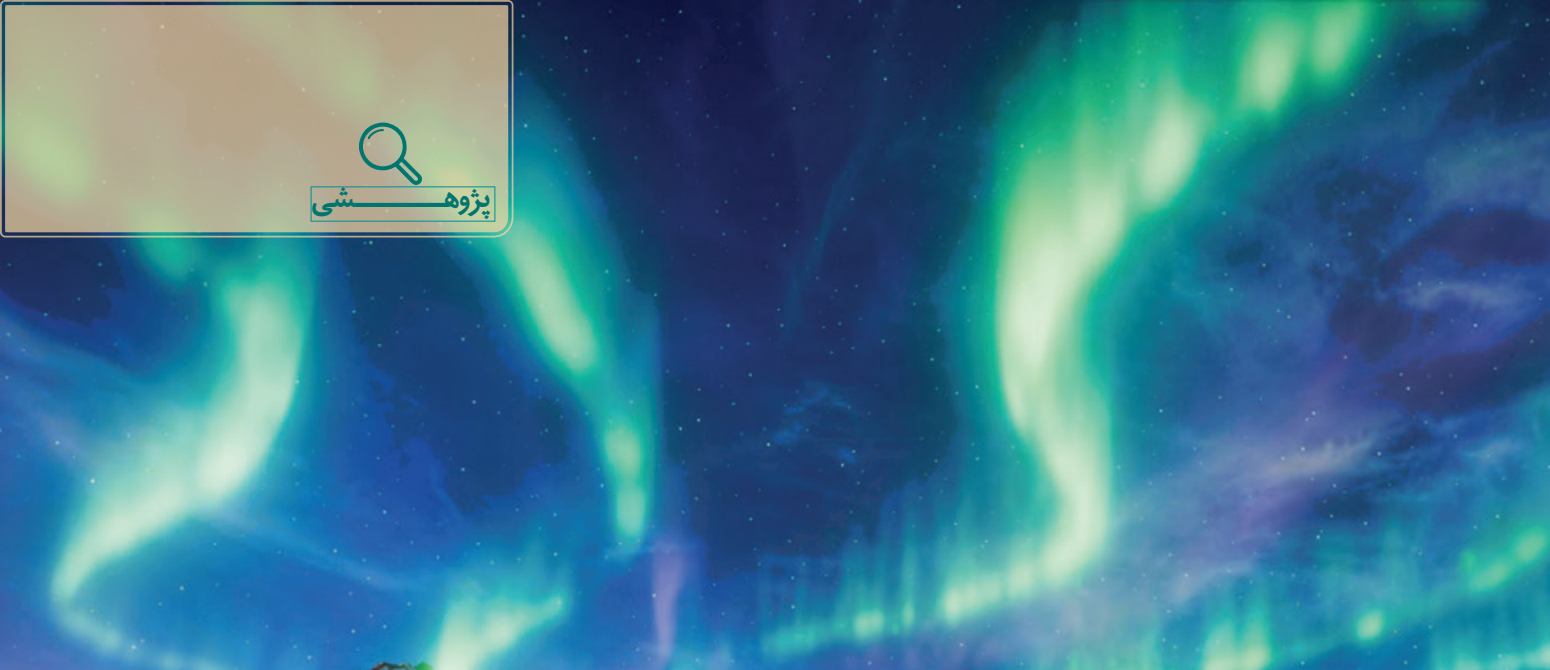


سپیده‌دم مغناطیسی

زهرا باقری

اشاره

تدریس مبحث میدان مغناطیسی در فیزیک دورهٔ متوسطه دوم همیشه برای من یکی از جذاب‌ترین کارها بوده است. چون می‌توانم برای دانش‌آموزان کرهٔ زمین را به‌عنوان بزرگ‌ترین آهنربایی که می‌توانند ببینند مثال بزنم و پدیده‌های ناشی از این میدان را به آن‌ها نشان دهم. یکی از این پدیده‌های طبیعی، شفق قطبی است که تحت‌تأثیر میدان مغناطیسی زمین بر پرتوهای کیهانی به وجود می‌آید و از زیباترین مناظر بر روی کرهٔ زمین است، تا جایی که سالانه میلیون‌ها گردشگر را به مناطق شمالی کرهٔ زمین جذب می‌کند. آشنا کردن دانش‌آموزان با این پدیده به‌عنوان مثالی طبیعی از آثار میدان مغناطیسی، نیازمند داشتن یک دسته اطلاعات اولیه از دانش نجومی پرتوهای کیهانی است.

در این مقاله ابتدا به معرفی پرتوهای کیهانی پرداخته‌ایم، و سپس میدان مغناطیسی زمین را شرح داده‌ایم و برای درک بهتر موضوع فیلم‌هایی نیز برای آشنایی بیشتر شما با این پدیدهٔ فیزیکی قرار داده‌ایم.

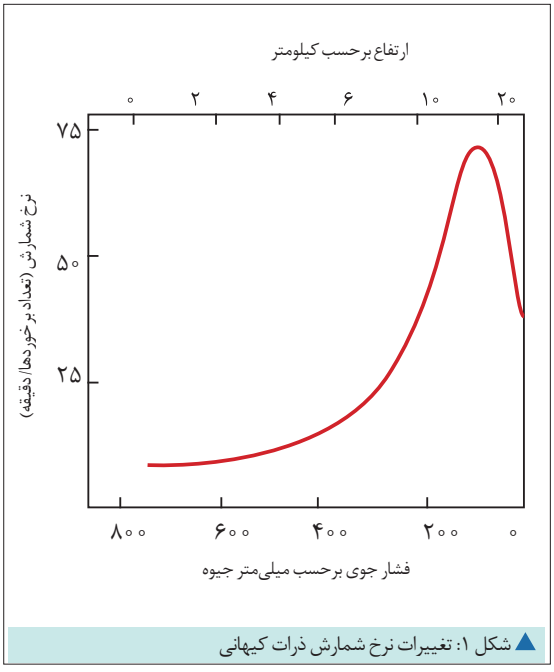
پرتوهای کیهانی

بعد از اینکه هنری بکرل[1] در سال ۱۸۹۶ به کشف پدیدهٔ رادیواکتیو نایل آمد، به نظر می‌رسید که تابش‌های موجود در محیط که تقریباً در همه‌جا حضور دارند از چشمه‌های شناخته‌شدهٔ رادیواکتیو تولید می‌شوند. اما زمانی که دانشمندان با استفاده از ورقه‌های الکتروسکوپ طلا به مطالعه رسانایی گازها پرداختند، پی بردند که هر چقدر هم که الکتروسکوپ‌های مورد استفاده در آزمایش از منابع احتمالی تابش پرتوها دور باشند باز هم به آرامی تخلیه می‌شوند؛ نتیجه اینکه پرتوهای ناشناخته‌ای وجود دارند که سبب این تخلیه می‌شوند.

به دنبال این وضعیت، در سال ۱۹۰۱ دو گروه تحقیقاتی در آلمان و انگلستان این پدیده را بررسی کردند. هر دو گروه به این نتیجه رسیدند که این پرتوهای ناشناخته از چشمه‌های ناشناخته‌ای به زمین می‌رسند. در این میان ویلسون[2] گمانه‌زنی کرد که ممکن است یونیزاسیون (تخلیه) به علت تابش پرتوهایی ناشی از چشمه‌های خارج از جو زمین باشد و گفت احتمالاً این پرتوها مانند پرتوهای رونتگن یا پرتوهای کاتدی هستند. با این تفاوت که از قدرت نفوذ

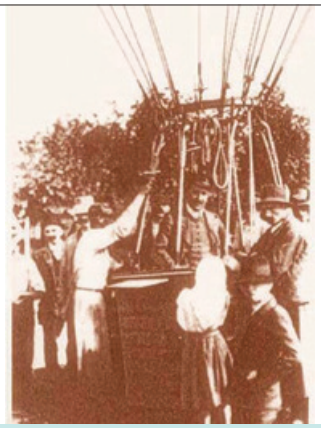
فوق‌العاده بیشتری برخوردارند. یک سال بعد دو گروه تحقیقاتی در دانشـــگاه تورنتوی کانادا نشـــان دادند که با قرار دادن مانع ســـرب در جلوی الکتروسکوپ این تابش اسرارآمیز ۳۰ درصد کاهش می‌یابد. در سال ۱۹۰۷ تئودور ولف[۳] از مؤسسه فیزیک کالج ایگنتوس در والکنبورگ هلند، برای نشان دادن تابش در ارتفاعات یک الکتروسکوپ را به بالای برج ایفل برد. وی متوجه شد که شدت تابش‌ها با دور شدن از سطح زمین زیاد می‌شود. بنابراین نتیجه گرفت که منشـــأ این تابش‌ها از ســـطح زمین نیست و آن‌ها باید از خارج از جو بیایند.

در سال ۱۹۱۲ دومنیکو پاچینی[۴] ایتالیایی شدت تابش‌ها را به‌طور هم‌زمان در بالای دریا و استخر اندازه‌گیری کرد و نتیجه گرفت که بخش اصلی این تابش‌هـــا از منابعی خارج از زمین می‌آیند. در همان سال ویکتور هس[۵] سه الکتروسکوپ با دقت بالا ســـاخت و آن‌ها را در بالون‌هایی قرار داد و به بالا فرستاد و شـــدت تابش را در ارتفاعات مختلف به دست آورد. در ارتفاع ۵۳۰۰ متری نسبت تابش‌ها ۴ برابر سطح زمین بود. او دریافت که شدت تابش‌ها با افزایش ارتفاع زیادتر می‌شود.



▲ شکل ۱: تغییرات نرخ شمارش ذرات کیهانی

ویکتور هس داخل بالون دو اتاقک یونی سربســـته قرار داد و با این کار متوجه شـــد که در ابتدا میزان یونیزاسیون کم است اما در ارتفاع ۱۵۰۰ متری، شروع به افزایش می‌کند تا اینکه در ارتفاع ۵۰۰۰ متری میزان یونیزاسیون به بیش از دوبرابر میزان یونیزاسیون در سطح زمین می‌رسد. وی در نوامبر همان سال نوشت: «نتایج این مشاهدات بهترین توضیح در اثبات ورود یک تابش با قدرت نفوذ زیاد از بالا به اتمسفر است.»


▲ شکل۲: ویکتور هس بعد از فرود بالون در سال ۱۹۱۲

این رخداد، چنان‌کـــه هارویت در ۱۹۸۱ گزارش داد، آغازگر نجوم پرتوهای کیهانی بود. باید گفت که هس این آزمایش‌ها را باز هم در شـــرایطی که کسوف کامل بود و بیشتر تابش‌های مرئی خورشـــید به علت وجود ماه مسدود شده بود انجام داد و همان نتایج قبل را به دست آورد. در نتیجه خورشید را به‌عنوان منبع این تابش‌ها نامحتمل دانست و نتیجه گرفت که تابش‌ها، با قدرت نفوذپذیری بسیار زیادشان، از فضای خارج وارد اتمسفر زمین می‌شوند، از این سبب آن‌ها را پرتوهای کیهانی نامید. دو دهه بعد، هس برای این کشـــفش، در سال ۱۹۳۶ جایزه نوبل دریافت کرد. در ســـال‌های ۱۹۱۳ و ۱۹۱۴ ورنر کلهاورستر[۶] با اندازه‌گیری افزایش شدت تابش‌ها در ارتفاع 9km نتایج ویکتور هس را تأیید کرد.

رابرت میلیکان[۷] نیز در ســـال ۱۹۲۵ ثابت کرد که پرتوهای کیهانی از خارج از محیط زمین می‌آیند. وی اعتقاد داشت که پرتوهای کیهانی، پروتون‌های بســـیار پرانرژی یا الکترون‌های ثانویـــه تولیدشـــده در «پراکندگی کامپتـــون» پرتوهای گاما هستند. خود کامپتون بر این باور بود پرتوهای کیهانی، ذرات باردار اولیه هســـتند. پراکندگی کامپتون عبارت است از اینکه پرتو ایکس در اندرکنش با ماده انرژی خود را از دست می‌دهد و طول موجش افزایش می‌یابد. کامپتون فیزیک‌دان آمریکایی و برنده نوبل فیزیک ۱۹۲۷ بود.

در سال ۱۹۲۷ دیمیتر اســـکوبلزین[۸] با استفاده از اتاقک ابر شیارهای ایجاد شده توسط پرتوهای کیهانی را ترسیم کرد.

در ســـال ۱۹۲۷، کلای در ســـفری از آمســـتردام به جاوه در اندونزی، پی برد که با تغییر عرض جغرافیایی، شدت پرتوهای کیهانی نیز تغییر می‌یابد. در نزدیکی خط اســـتوا، قبل از ورود به میدان مغناطیســـی زمین، شدت این پرتوها کمتر می‌شود. او هم چنین پی برد که پرتوهای کیهانی عمدتاً از ذرات باردار تشکیل شـــده‌اند. در سال ۱۹۳۰ برونو راسی نشان داد که اگر پرتوهای کیهانی عمدتاً باردار باشند باید اثرات شرق و غرب نیز وجود داشته باشند.

در بهار سال ۱۹۳۳ دو گروه آمریکایی، جانسون و توماس از بورتل، و لوئیس آلوارز و آرتور کامپتون از دانشگاه شیکاگو، به‌طور هم‌زمان و مستقل، اثرات شرق و غرب را اندازه‌گیری کردند. آن‌ها با انجام این تحقیقات نشان دادند که پرتوهای کیهانی عمدتاً بار مثبت دارند. در اواخر دهه ۱۹۳۰، شاین و همکارانش در پرواز بالون از شمارشگر گایگر[10] استفاده کردند و دریافتند که بیشترین ذرات اولیه، الکترون‌ها نیستند. از این‌رو پروتون‌ها مؤلفه‌های غالب پرتوهای کیهانی به شمار می‌آیند.

شمارشگر گایگر مولر یک نوع شمارشگر ذرات بنیادی است که توانایی شناسایی ذرات باردار را دارد و از آن معمولاً برای سنجش آلودگی رادیواکتیو استفاده می‌شود. این شمارشگر یک محفظهٔ پر شده از یک گاز بی‌اثر است که از وسط آن یک سیم نازک می‌گذرد. در اثر اعمال ولتاژ به سیم، جریانی از الکترون ایجاد می‌شود. وقتی پرتوهای یونیزه‌کننده وارد محفظه می‌شوند، گاز درون لوله، الکتریسیته را بین محفظه و سیم هدایت می‌کند که ایجاد نویز می‌شود. برای آشنایی بیشتر با طرز کار این شمارنده فیلم شماره ۱ را تماشا کنید.

https://www. roshdmag. ir/u/20b

در طی دهه ۱۹۲۷ ـ ۱۹۳۷ تحقیقات آزمایشگاهی مختلف نشان داد که پرتوهای کیهانی اولیه اکثراً ذرات باردار مثبت هستند. همچنین تابش‌های ثانویهٔ مشاهده‌شده در سطح زمین به‌طور کلی از یک «مؤلفه نرم» شامل الکترون‌ها و پروتون‌ها و یک «مؤلفه سخت» شامل ذراتی مانند میون‌ها ساخته شده است. در آن زمان فکر می‌شد که میون‌ها ذرات ناپایداری هستند که توسط هیدکی یوکاوا[11] در سال ۱۹۳۵ در تئوری نیروهای هسته‌ای پیشگویی شده بود. آزمایش‌ها ثابت کرد که میون با میانگین طول عمر $2/2\ \mu_s$ به یک الکترون و دو نوترینو واپاشیده می‌شود و چون برهم‌کنش قوی با هسته ندارد، ذره یوکاوا نمی‌تواند باشد. این معما با کشف پایون در سال ۱۹۴۷ که به‌طور مستقیم در برهم‌کنش‌های هسته‌ای پرانرژی تولید می‌شد، حل شد. پایون‌ها به یک میون و یک نوترینو با میانگین زمانی $0/0026\ \mu_s$ واپاشیده می‌شوند. واپاشی‌های پی‌درپی، به‌طور مستقیم در یک آزمایش میکروسکوپی از شیارها قابل مشاهده است که در آن باریکه‌ای از ذرات در نوع خاصی از فیلم عکاسی در معرض پرتوهای کیهانی قرار گرفته‌اند. وان آلن[12] و گوتلیب[13] در سال ۱۹۴۸ این فیلم‌های عکاسی را با بالن به بالای اتمسفر بردند و از نتایج به‌دست‌آمده دریافتند که ذرات کیهانی اولیه اکثراً پروتون‌ها و کمی هسته‌های هلیم و قسمت کوچک‌تری از هسته‌های سنگین‌تر هستند.

در سال ۱۹۳۴ برونو راسی در آزمایشی، تخلیه هم‌زمان دو شمارنده مجزای گایگر را مشاهده کرد و به این نتیجه رسید که علت انطباق دو شمارنده که در فاصله دوری از هم قرار دارند برخورد یک بهمن هوایی با تجهیزات شمارنده است.

در سال ۱۹۳۷ پیر اوژه[14] که از نتایج راسی بی‌خبر بود نتایج مشابهی به دست آورد و جزئیات آن را بررسی کرد. وی دریافت که بهمن‌های گسترده هوایی، از ذرات پرتوهای کیهانی پرانرژی که با اتمسفر زمین برهم‌کنش می‌کنند، تولید می‌شوند. یک بهمن از برهم‌کنش‌های ثانویه‌ای آغاز می‌شود که محصول نهایی آن بهمنی از الکترون‌ها، فوتون‌ها و میون‌هاست.

▲ شکل ۳: تصویری از پیر اوژه

هومی بهابها[15] در سال ۱۹۳۸ نتیجه گرفت که مشاهده ویژگی‌های ذرات به تحقیق‌های آزمایشگاهی دقیق تئوری نسبیتی آلبرت اینشتین[16] منتهی خواهد شد.

در سال ۱۹۴۸ یک گروه تحقیقاتی از دانشگاه مینه‌سوتا و دانشگاه روچستر، با استفاده از اتاق‌های تیره و امولسیون‌های هسته‌ای در بالون، حضور هسته‌های سنگین‌تر را در پرتوهای کیهانی کشف کردند. فرمی در سال ۱۹۴۹ پرتوهای کیهانی را به‌عنوان گازی متشکل از ذرات نسبیتی باردار در حال حرکت در میدان مغناطیسی بین‌ستاره‌ای در نظر گرفت. مقاله او زمینه‌ای برای نظریه مدرن شتاب‌دهنده پرتوهای کیهانی شد. مطالعات بیشتر نشان داد که پرتوهای کیهانی شامل همه عناصر بین هیدروژن و آهن، از جمله فراوانی بیش از حد عناصر Li، Be و B می‌باشد. سپس در سال ۱۹۵۰ فهمیدند که بخش قابل توجهی از تابش رادیویی، تابش سنکروترون بوده که نشان‌دهنده حضور زیاد الکترون نسبیتی در سراسر کهکشان ما، تعدادی منابع گسسته و همچنین منابع فراکهکشانی است.

در سال ۱۹۵۴ اعضای «گروه پرتوکیهانی راسی» در مؤسسهٔ فنی ماساچوست توانستند انرژی و جهت ورودی پرتوهای کیهانی را اندازه‌گیری کنند. در این آزمایش از یازده آشکارساز سنتیلاتوری که در درون دایره‌ای به قطر ۴۶۰m در رصدخانه دانشگاه هاروارد قرار دارد، استفاده کردند. از این کار و آزمایش‌های دیگری که در سراسر جهان انجام گرفت طیف انرژی پرتو کیهانی اولیه که می‌توان آن را تا انرژی بالای $10^{20}\ eV$ گسترش داد، به دست آمد. آزمایش بزرگ بهمن هوایی که پروژه اوژه نام گرفته است در مکانی در دشت مرتفعی در آرژانتین توسط کنسرسیوم بین‌المللی فیزیک‌دانان اجرا شد و هدف از آن بررسی ویژگی‌ها و جهت ورودی پرتو کیهانی اولیه است. نتایج به‌دست‌آمده برای فیزیک ذرات و کیهان‌شناسی اهمیت زیادی دارد. نتایج اولیه‌ای که در نوامبر ۲۰۰۷ به دست آمد جهت ۲۷ تا از پرانرژی‌ترین رخدادها را نشان داد که به موقعیت هسته‌های کهکشانی فعال

در سال ۱۹۳۴ برونو راسی در آزمایشی، تخلیه هم‌زمان دو شمارنده مجزای گایگر را مشاهده کرد و به این نتیجه رسید که علت انطباق دو شمارنده که در فاصله دوری از هم قرار دارند برخورد یک بهمن هوایی با تجهیزات شمارنده است

(AGN) جایی که اعتقاد داشـــتند پروتون‌ها توســـط میدان مغناطیسی قوی شتاب می‌گیرند و ســـیاه‌چاله‌های بزرگ در مرکز (AGN) مربوط می‌شود.

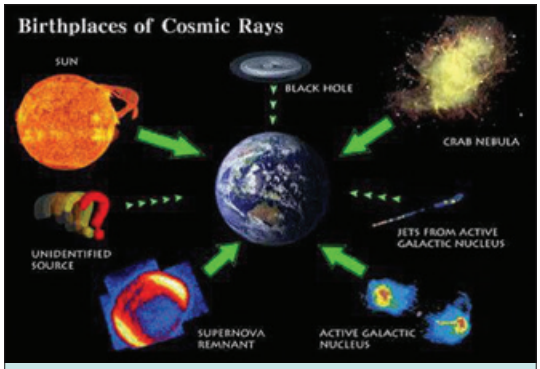
منابع احتمالی پرتوهای کیهانی

بعضی از ذرات کیهانی انرژی بســـیار زیادی دارند. این انرژی گاهی به 10^{20}eV (در حدود ۲۰ ژول) می‌رسد. بنابراین یکی از سؤالات اساسی و بنیادی در فیزیک پرتوهای کیهانی این است که منشأ این ذرات تا این سطح انرژی چیست؟

از آنجا که پرتوهای کیهانی، به علت باردار بودن، در میدان‌های مغناطیسی کهکشانی و بین‌کهکشانی منحرف می‌شوند و جهت اولیه خود را از دســـت می‌دهند، بنابراین نمی‌توان با استفاده از جهـــت این پرتوها به جهت منبع تولیدکننده آن‌ها پی برد، مگر در انرژی‌های بسیار بسیار بالا که انرژی این ذرات بیش از 10^{19}eV (تقریباً یک ژول) است.

در حال حاضر با تقریب زیادی معلوم شده که پرتوهای کیهانی در دو دستهٔ گســـترده پایین می‌آیند. دسته اول که در اقلیت هســـتند و از روی تغییرات کم مربوط به شار پرتوهای کیهانی بین شـــب و روز مشخص شده‌اند، مربوط به خورشیدند. رابطهٔ بین افزایش شـــدت پرتوهای کیهانی با شعله‌های خورشیدی (انفجارهای عظیم بر روی سطح خورشید که با تلسکوپ دیده می‌شوند) آشکار شده است، اما بیشتر پرتوهای کیهانی از فواصل بسیار دورتر می‌آیند. در حال حاضر تصور بر این است که این پرتوها از کهکشـــان خود ما (راه شیری) سرچشمه می‌گیرند، ناحیه‌ای که شامل حدود یکصد میلیارد ستاره از جمله منظومه شمسی اســـت. کل این کهکشـــان حدود صدهزار سال نوری ضخامت دارد و ما تقریباً در صفحه استوایی آن، یعنی در حدود نیمه راه از مرکز قرار گرفته‌ایم. غبار و ستاره‌ها اغلب در ناحیهٔ استوایی کهکشان متمرکز شده‌اند.

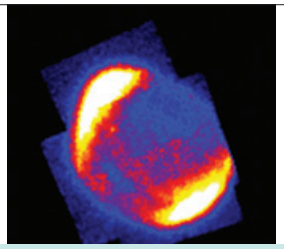
بعضی از انفجارها به بارشی از گاز و گردوغبار و برخی دیگر به ستاره‌های نوترونی و سیاه‌چاله‌ها تبدیل می‌شوند. این انفجارات البته بسیار نادر هستند



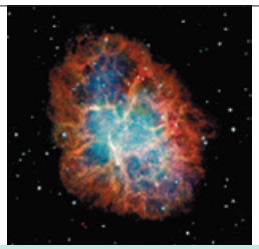
▲ شکل ۴: صورت کلی منابع پرتوهای کیهانی

بقایای ابرنواخترها (SNRs)

ابرنواختر ناشی از انفجار یک ستاره است. جرم در یک لحظه ســـتاره‌ای که چندین میلیون برابر جرم خورشید دارد منفجر می‌شـــود و ظرف مدت چند ساعت یا چند روز تاریک و کم‌نور می‌شـــود. بعضی از انفجارها به بارشی از گاز و گردوغبار و برخی دیگر به ســـتاره‌های نوترونی و ســـیاه‌چاله‌ها تبدیل می‌شوند. این انفجارات البته بســـیار نادر هســـتند. تلسکوپ‌های نجومی بزرگ در ســـال‌های ۱۵۷۲ و ۱۶۰۴ انفجارات ابرنواخترها را در کهکشان‌ها ثبت کردند، که هر کدام از آن‌ها ویژگی‌های مختلفی از درخشندگی را نسبت به زمان داشتند و سرانجام با رسیدن به نیمه عمر، یعنی ۵۵ روز، کم‌نور و سپس ناپدید شدند.


▲ شکل ۵: ابرنواختر ۱۰۰۶ را نشان می‌دهد

در سال ۱۰۴۵ ستاره‌شناسان چینی یک انفجار ابرنواختری را مشاهده کردند که بسیار درخشان و در وسط روز قابل رؤیت بود. این انفجار گاز و گردوغبار به‌عنوان سحابی خرچنگ نام گرفته است.


▲ شکل۶: تصویری از سحابی خرچنگ

وقتی یک ســـتاره از بین می‌رود، بخـــش عظیمی از انرژی آن صرف شتاب دادن ذرات می‌شـــود. ستاره‌شناسان کشف کرده‌انـــد که باقی‌مانده نواختر RCW۸۶ که در فاصله ۸۲۰۰ سال نوری از ما قرار داشته و در سال ۱۸۵ پس از میلاد مسیح توسط منجمان چینی ثبت شده است، یکی از منابع پرتوهای کیهانی محسوب می‌شـــود. این قدیمی‌ترین ثبت نواختر در تاریخ نجوم است.

▲ شکل ۷: تصویری از ابرنواختر RCW۸۶

درســـت اســـت که بیشـــتر پرتوهای کیهانی از انفجارات

ابرنواخترها شـــتاب می‌گیرند ولی این به این معنا نیست که ابرنواخترها خودشان منفجر می‌شوند و ذراتی با این انرژی را به بیرون پرتاب می‌کنند. بقایای انفجارات ابرنواخترها که هزاران ســـال از عمر آن‌ها می‌گذرد از ابرها و گازهای منبسط شده تشکیل شده‌اند و به‌طور تصادفی ذرات در میدان مغناطیسی، انرژی و ســـرعت زیادی به دست می‌آورند. به طوری که این بقایای ابرنواخترها نمی‌توانند آن‌ها را در خودشـــان نگه دارند و این ذرات با ســـرعت و انرژی زیاد به داخل کهکشـــان فرار می‌کنند. با تماشای فیلم شماره ۲ می‌توانید ثبت انفجار یک ابرنواختر را که در ۸۰ میلیون ســـال پیش یعنی زمان زندگی دایناسورها رخ داده و اکنون نور آن به ما رسیده است ببینید.

https://www. roshdmag. ir/u/20c

هسته‌های کهکشانی فعال

از دیگر منابع انتشار پرتوهای کیهانی هسته‌های کهکشانی فعال (AGN) هســـتند. AGN یک نام کلی برای آن دســـته از کهکشان‌هایی اســـت که در مرکزشان سیاه‌چاله پرجرمی وجود دارد. از هر ۱۵ دسته پرتو کیهانی پرانرژی که به سمت زمین می‌ایند ۱۲تای آن‌ها از هســـته‌های کهکشانی فعالند. تعداد کهکشـــان‌های کیهانی در حدود 10^{11} است که تقریباً یک درصد آن‌ها هســـته‌های فعال دارند. یعنی در حدود 10^{9} هسته کهکشانی فعال وجود دارد.

▲ شکل ۸: جت ذرات خارج‌شده از داخل هسته فعال کهکشانی

بادهای خورشیدی

بادهای خورشـــیدی از ســـال‌های اولیه عصر فضا یعنی از اوایل دهه ۶۰ قرن بیســـتم تاکنون بررســـی شده‌اند. بادهای خورشیدی ذراتی هستند که از خورشید جدا شده و به‌صورت باد یا جریانی از ذرات به فضای بین‌ســـتاره‌ای فرار می‌کنند. این ذرات متشـــکل از الکترون، پروتـــون، ذره آلفا و مقداری عناصر سنگین‌تر هستند. سرعت این بادها بین ۲۰۰ تا ۹۰۰ کیلومتر بر ثانیه اســـت و ذراتی را کـــه حمل می‌کنند چهار تا پنج روز بعد به زمین می‌رســـند. ایـــن ذرات در دمای زیادِ تاج خورشـــیدی به تدریج بر سرعتشـــان افزوده می‌شود و از میدان جاذبه خورشید می‌گریزند. در نتیجه زمانی که فعالیت خورشیدی بیشـــتر باشد، تعداد و انرژی این ذرات هم بیشتر می‌شـــود. بعد از گذشـــت حدود ۴۰ دقیقه از اینکه پرتوهای کیهانی موجود در فوران‌های خورشید بیشترین شدت را پیدا می‌کنند، اول سریع‌ترین ذرات، و در ساعات بعد، ذرات کندتر به زمین می‌رســـند. در فیلم شماره ۳ ثبت شراره خورشیدی تاریخ ۱۴ جولای ۲۰۱۷ توسط ناسا نشان داده شده است که ذرات آن به‌صورت باد خورشیدی به زمین می‌رسند.

https://www. roshdmag. ir/u/20d

زمینه‌های مهم تحقیق و مطالعهٔ پرتوهای کیهانی

طی حدود بیست ســـال، تحقیقات پرتو کیهانی تنها عرصهٔ کشف ذرات زیراتمی جدید بود. ما در حال حاضر می‌دانیم که این ذرات از برخورد بین هسته‌های عبورکننده با سرعتی بیش از نصف سرعت نور پدیدار می‌شـــوند. براساس فرمول مشهور اینشتین $E=mc^2$، مقداری از انرژی برخورد، دوباره به‌صورت جرم ذرات جدید آشکار می‌شود.

اولین بار در اوایل دهـــه ۱۹۳۰ ذرات جدید، در بین پرتوهای کیهانی ظاهر شدند و تعداد آن‌ها بعد از جنگ جهانی اول، زمانی که پژوهش‌های پرتو کیهانی ســـرعت یافته بود، زیاد شد. از آن زمان عصر جدید فیزیک ذرات شروع شد. تا اینکه همزمان با ورود شتاب‌دهنده‌های بزرگ در دهه ۱۹۵۰ پرتوهای کیهانی به‌طور محسوســـی به‌عنوان منبع ذرات جدید جایگزین شدند. حتی هنوز هم پرانرژی‌ترین ذرات این شتاب‌دهنده‌ها، چند میلیون بار کم‌انرژی‌تر از برخی ذراتی هستند که می‌توان در میان پرتوهای کیهانی پیدا کرد (البته به ندرت و به‌طور کنترل نشده).

اولین بار در اوایل دهه ۱۹۳۰ ذرات جدید، در بین پرتوهای کیهانی ظاهر شدند و تعداد آن‌ها بعد از جنگ جهانی اول، زمانی که پژوهش‌های پرتو کیهانی سرعت یافته بود، زیاد شد

طیف انرژی پرتوهای کیهانی

محدوده مقدار انرژی تابش‌های کیهانی بسیار گسترده است و از 10^{9} eV تا 10^{20} eV را شامل می‌شود. هنگامی که مطالعات پرتو کیهانی پیشرفت کرد، مشخص شد که انرژی ذرات تک، که در واحد الکترون ولت (eV) اندازه‌گیری می‌شـــود، اغلب بسیار بالاســـت. در دمای اتاق، انرژی نوعیِ یک مولکول هوا چندصدم یک الکترون ولت است در حالی‌که پرتوهای کیهانی انرژی‌هایی بالای یک میلیارد (10^{19}) الکترون ولت دارند.

تغییرات تعداد پرتوهای کیهانی برحســـب انرژی را «طیف انرژی» می‌گویند.

شار پرتوهای کیهانی که تا به حال اندازه‌گیری شده، تقریباً در همه جهات یکســـان است. یعنی مستقل از زاویه فضایی و همسانگرد می‌باشد.

نمودار شـــار (تعداد ذرات ورودی بر واحد ســـطح بر واحد زمان) پرتوهای کیهانی صاف و هموار است به جز در دو نقطه در انرژی‌های 10^{15} eV و 10^{18} eV که تغییر ناگهانی مشاهده می‌شـــود، در غیر این صورت نمودار به‌صورت یک خط صاف درمی‌آمد. شکســـت اول در انرژی 10^{15} eV اتفاق افتاده است که به زانوی منحنی[17] معروف اســـت و نقطه شکست دوم در انرژی 10^{18} eV رخ داده است که به آن قوزک منحنی[18] گویند.

تعیین ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی

یکی از سؤال‌های مهم در مورد پرتوهای کیهانی پرانرژی این است که ترکیب جرمی این پرتوها چگونه است. از آنجا که پاسخ به این سؤال به‌طور مستقیم و با استفاده از آشکارسازهای ذرات معمولی کار بسیار دشواری است، ما در این قسمت به روش‌های تعیین ترکیب جرمی و انواع آشکارسازها برای این منظور می‌پردازیم:

از آنجا که نوکلئون‌های هر عنصر بار منحصربه‌فردی دارد، ما برای تعیین ترکیب جرمی پرتوهای کیهانی به‌طور جداگانه بار هر یک از ذرات پرتوهای کیهانی را اندازه‌گیری می‌کنیم. تعیین بار پرتوهای کیهانی به دو روش مستقل از هم صورت می‌گیرد:

الف. تعیین نسبت کاهش انرژی پرتوهای کیهانی در عبور از آشکارسازها، که این کاهش انرژی با $\left(\frac{\text{بار}^2}{\text{سرعت ذرات}}\right)$ متناسب است.

ب. تعیین سرعت یا یک حالت وابسته به آن که مستقل از کاهش انرژی است.

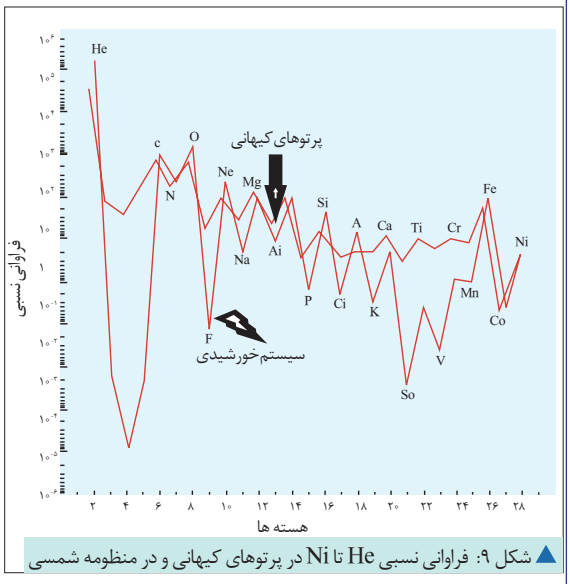
آشکارسازها برای این منظور به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الف. آشکارسازهای ثبتی مثل: امولسیون عکاسی[19]

ب. آشکارسازهای بصری مثل: اتاقک ابر[20]

ج. آشکارسازهای الکترونیکی مثل: شمارنده‌های گایگر ـ مولر[21]

در سال ۱۹۵۶ فرانک مک‌دونالد[22] برای تعیین ترکیب جرمی و سرعت پرتوهای کیهانی دو آشکارساز الکترونیکی (کونتورهای سنتیلاتور و چرنکوف) را با هم ترکیب کرد. این ترکیب جدید از دو آشکارساز، اندازه‌گیری‌های خوبی از فراوانی نسبی عناصر سنگین‌تر از آهن به دست آورد. از آنجا که عناصر سنگین‌تر از آهن کمیاب هستند، برای شناسایی آن‌ها به روش‌های جدیدتری احتیاج است.



▲ شکل ۹: فراوانی نسبی He تا Ni در پرتوهای کیهانی و در منظومه شمسی

همان‌طور که در شکل ۱۰ نشان داده شده است، در مورد عناصر پرتوهای کیهانی موجود در منظومه شمسی، استثناهایی به شرح زیر وجود دارد:

ـ هم طیف پرتوهای کیهانی ناشی از خورشید و هم طیف پرتوهای کیهانی کهکشانی اثرات زوج و فردی را نشان می‌دهند.

ـ هسته‌های زوج (Z زوج) فراوان‌تر از هسته‌های فردند.

ـ در پرتوهای کیهانی هسته‌های سنگین‌تر بیشترند تا در خورشید.

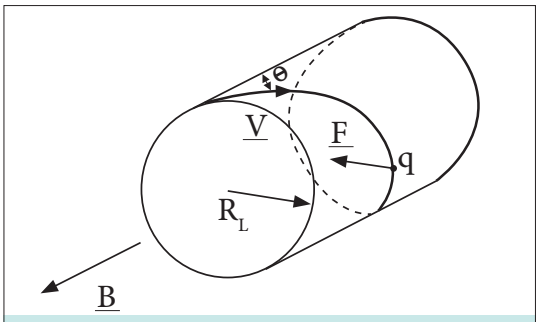
ـ گروه عناصر Li و Be و B و گروه Mn و Ti و Sc در پرتوهای کیهانی بیشتر از خورشید وجود دارند، زیرا امکان تولید این ذرات در اثر برخورد ذرات سنگین‌تر در محیط بین‌ستاره‌ای بیشتر است و در نتیجه فراوان‌ترند.

گروه عناصر Li و Be و B و گروه Mn و Ti و Sc در پرتوهای کیهانی بیشتر از خورشید وجود دارند، زیرا امکان تولید این ذرات در اثر برخورد ذرات سنگین‌تر در محیط بین‌ستاره‌ای بیشتر است و در نتیجه فراوان‌ترند

بررسی جهت‌های بارش پرتوهای کیهانی

از کشف پرتوهای کیهانی بیش از یک قرن می‌گذرد اما منشأ و منبع تولید آن‌ها و فرایند انتشار آن‌ها در کهکشان، همچنان سؤالی است که جواب آن به درستی معلوم نیست. علت عمدهٔ این سردرگمی آن است که پرتوهای کیهانی باردار هستند و مسیر حرکت آن‌ها تحت‌تأثیر میدان مغناطیسی درون کهکشان مدام تغییر می‌کند. از این‌رو جهتی که پرتوهای کیهانی وارد جو زمین می‌شوند به هیچ وجه جهت چشمه‌ای نیست که این پرتوها در آن تولید شده‌اند. به‌عنوان مثال پروتون با انرژی 10^{15}eV در میدان مغناطیسی 1μG که برآوردی از میدان مغناطیسی درون کهکشان است، مسیر خمیده‌ای با شعاع انحناء 1pc طی می‌کند. اما میدان مغناطیسی درون کهکشان یک میدان مغناطیسی ثابت و یکنواخت نیست، بلکه در مقیاس‌های 10^{8}cm تا 10^{20}cm رفتار کاملاً آشوبناک و نامنظمی دارد. از این‌رو مسیر حرکت پرتوهای کیهانی در حین حرکت در کهکشان، مدام تغییر می‌کند تا اینکه شار پرتوهای کیهانی درون کهکشان توزیع زاویه‌ای همسانگرد پیدا می‌کند. به همین دلیل، هر چقدر هم پرتوهای کیهانی بیشتر ثبت شود، هیچ اطلاعی از منشأ توزیع این پرتوها به دست نمی‌آید. اما از طرفی با افزایش انرژی پرتوهای کیهانی این همسانگردی از بین می‌رود، زیرا تقریب‌هایی که برای فرایند پخش پرتوهای کیهانی تاکنون وجود داشت، بی‌اعتبار می‌شوند، به گونه‌ای که ضریب پخش پرتوهای کیهانی آن‌قدر بزرگ می‌شود که ناهمگنی ذاتی که در توزیع چشمه‌های پرتوهای کیهانی در کهکشان وجود دارد، به نحوی در داده‌ها آشکارسازی می‌شود. باور کلی بر این است که تعداد چشمه‌های تولید پرتوی کیهانی در مرکز کهکشان بسیار بیشتر از تعداد آن‌ها در نواحی خارجی مرکز کهکشان است. این امر باعث می‌شود که شار پرتوهای

کیهانی که از سمت مرکز کهکشان دریافت می‌شود تا حدودی از شار پرتوهای کیهانی دریافت‌شده از خارج مرکز کهکشان بیشتر باشد. یعنی پرتوهای کیهانی که از صفحهٔ کهکشان به سمت هاله آن حرکت می‌کنند، می‌توانند باعث بروز ناهمسانگردی در شار پرتوهای کیهانی شوند. ناهمسانگردی که در شار پرتوهای کیهانی به وجود می‌آید، معادله‌ای صریح و قابل پیش‌بینی ندارد. به فرض آنکه محل دقیق چشمه‌های تولید پرتوهای کیهانی درون کهکشان را هم بدانیم، شرایط و فرآیند انتشار این پرتوها که به ساختار ریزمقیاس و بزرگ‌مقیاس میدان مغناطیسی درون کهکشان بستگی دارد، روی این ناهمسانگردی تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، ناهمسانگردی به موقعیت زمین یا راصد نسبت به میدان مغناطیسی مؤثر اطراف آن، که می‌تواند بازوهای کهکشان باشد، نیز بستگی دارد. پرتوهای کیهانی عموماً در راستای خطوط میدان مغناطیسی حرکت می‌کنند که مانند لوله‌هایی با ابعاد بزرگ‌تر از شعاع انحنا این پرتوهاست. در نتیجه جهتی که بیشینهٔ ناهمسانگردی را نشان می‌دهد، می‌تواند جهتی را مشخص کند که پرتوهای کیهانی در آن تولید شده‌اند.



▲ شکل ۱۰: شتاب‌گیری ذره در میدان‌ها

پرتوهای کیهانی و سلامتی انسان

انسان در محیط زیست خود به‌طور طبیعی از پرتوهای کیهانی که از فضای خارج از جو زمین فرود می‌آیند و پرتوهای گسیل شده از مواد پرتوزای اولیه موجود در پوسته زمین، به‌طور مستقیم متأثر می‌شود. علاوه بر منابع طبیعی، انسان در محیط زیست خود نیز از چشمه‌های صنعتی، پزشکی و غیره پرتوگیری می‌کند. در کشورهای غیرپیشرفته و در حال توسعه ۹۴ درصد کل پرتوگیری انسان از منابع طبیعی است که شامل پرتوهای کیهانی و زمینی می‌شود.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، پرتوهای کیهانی منشأ خورشیدی یا کهکشانی دارند و میزان جذب ناشی از آن‌ها در هوا به ازای اضافه شدن هر ۱۵۰۰ متر ارتفاع، دوبرابر می‌شود. همچنین، میزان تابش پرتوهای کیهانی به بدن انسان، بستگی به فصل و موقعیت روز دارد و مقدار آن در داخل ساختمان کمتر از هوای آزاد است. میزان جذب پرتوهای کیهانی در داخل منازل مسکونی بسته به نوع ساختمان و مصالح به‌کار برده‌شده، متفاوت است. پرتوها می‌توانند تأثیرات متعددی در سلول‌ها بر جای بگذارند. اثرات بیولوژیکی پرتوها بر روی یک موجود زندهٔ پرسلولی در اثر ایجاد تغییر در اجزای آن، یعنی سلول‌ها ایجاد می‌شود. از مهم‌ترین اثرات اشعه بر روی اجزای موجودات زندهٔ مختلف، اثرات دیررس آن‌هاست که در فواصل زمانی مختلف و گاه طولانی، بعد از تابش اشعه و دوزهای پایین، ایجاد می‌شود. در این‌گونه اثرات، بین زمان تابش و زمان ظهور علائم آن‌ها فاصله زمانی قابل‌توجهی وجود دارد.

این اثرات کاهش نامحسوس طول عمر، ظهور اثرات ژنتیکی در نسل‌های بعدی و وقوع انواع سرطان‌ها را شامل می‌شود. مکانیزم‌های سرطان‌زایی اشعه کاملاً شناخته نیست ولی احتمالاً هر سرطان دوران کودکی، ناشی از اشعه‌های زمینه طبیعی می‌باشد. از آنجا که پرتوهای کیهانی با افزایش ارتفاع زیاد می‌شوند، انتظار داریم مردمی که در اتفاعات بالاتر از سطح دریا زندگی می‌کنند نسبت به بقیه از این اشعه بیشتر رنج ببرند. برای مثال در کلرادو که در ارتفاع ۱۶۰۰ متری قرار گرفته، پرتودهی تابش کیهان دوبرابر نسبت به سطح دریاست.

اثر میدان مغناطیسی زمین

رفتار زمین به‌صورت یک آهن‌ربای بزرگ، قرن‌هاست که شناخته شده است. زمین طوری رفتار می‌کند که گویا یک آهن‌ربای میله‌ای قوی، حدود ۲۰۰ کیلومتر از مرکزش دارد که با محور چرخش زمین در یک راستا نیست. با تعمیم این آهن‌ربای خیالی به سطح زمین، یک قطب ژئومغناطیسی آن (حدود ۷۹° شمال، ۶۹° غرب) در گرین‌لند و قطب دیگر آن (۷۹° جنوب، ۱۱۰° شرق) در قطب جنوب است. برای آشنایی با میدان مغناطیسی زمین فیلم‌های شماره ۴ و ۵ را تماشا کنید.

https://www. roshdmag. ir/u/20e
https://www. roshdmag. ir/u/20f

هنگامی که پرتوهای کیهانی به زمین نزدیک می‌شوند، مسیرشان تحت‌تأثیر میدان مغناطیسی زمین و چند فاکتور دیگر قرار می‌گیرد: جهت اولیه حرکت آن‌ها، جرم، سرعت و بار ذره، و اینکه میدان مغناطیسی چگونه با فاصله از زمین تغییر می‌کند. به دلیل اینکه مسیر پرتوهای کیهانی به خاطر وجود میدان مغناطیسی در نزدیکی زمین منحرف می‌شود، مسیر این ذرات در نزدیکی زمین تا حدود زیادی حلقوی و به‌هم‌پیچیده است. در نتیجه تعداد و سرعت پرتوهای کیهانی نزدیک به زمین همانند آن ذراتی که بسیار دورند اندازه‌گیری نخواهد شد.

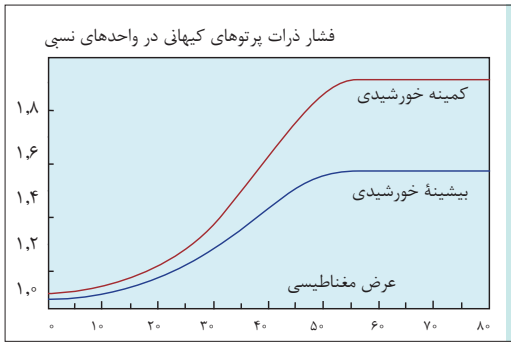
میدان مغناطیسی و کرهٔ زمین دو لایهٔ حفاظتی قدرتمند در برابر ریزش پرتوهای کیهانی هستند. میدان مغناطیسی همچون مانع طبیعی عظیمی برای ذرات پرتوهای کیهانی عمل می‌کند. اگر ذرات دارای انرژی باشند، از لایه‌های مگنتوسفر عبور می‌کنند

انسان در محیط زیست خود به‌طور طبیعی از پرتوهای کیهانی که از فضای خارج از جو زمین فرود می‌آیند و پرتوهای گسیل شده از مواد پرتوزای اولیه موجود در پوسته زمین، به‌طور مستقیم متأثر می‌شود

و به لایه‌های بالایی جو می‌رسند، اما اگر انرژی ذرات کافی نباشد، آن‌ها در جهت خط‌های نیروی مغناطیسی گرایش پیدا می‌کنند و به علت کمبود انرژی، به آسانی حرکت می‌کنند و به قطب‌ها می‌رسند. به همین دلیل ابتدا مناطقی که در نزدیکی قطب‌ها هستند این تابش‌ها را دریافت می‌کنند و سپس نواحی نزدیک استوا که به وسیله میدان مغناطیسی زمین بهتر محافظت می‌شوند. فیلم شماره ۶ را برای دریافت بهتر تماشا کنید.

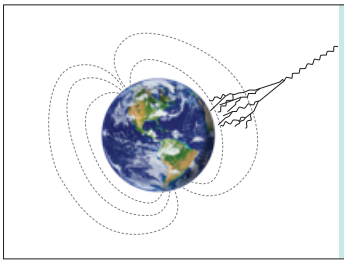
https://www. roshdmag. ir/u/20g

جاکوب کالی فیزیک‌دان هلندی، با استفاده از اتاقک‌های یونیزاسیون، ثابت کرد که پرتوهای کیهانی کمترین مقدار خود را در ناحیه استوایی میدان مغناطیسی زمین دارند و شدت آن‌ها تا حدود ۱۰ درصد در شمالی‌ترین ارتفاعات افزایش می‌یابد.



شکل ۱۱: منحنی عرض جغرافیایی پرتوهای کیهانی. مقدار کمینه در خط استوا اتفاق می‌افتد و مقدار بیشینه در عرض جغرافیایی قطب‌ها. منحنی‌ها نسبی‌اند، در ارتفاعات بالا شار پرتوهای کیهانی از هم جدا شده و با ارتفاع و فعالیت خورشیدی نوسان می‌یابند

اشترومر کسی بود که نظریه منشأ شفق شمالی را بیان کرد و نشان داد که یک فضای مرکزی و اصلی در اطراف زمین وجود دارد که برای ذرات بارداری که از مسافت‌های خیلی دور به ما نزدیک می‌شوند، دست‌نیافتنی است. این نظریه برای پرتوهای کیهانی، با فرض اینکه این ذرات باردار از جهات مختلف به زمین می‌رسند، به‌کار رفت. پرتوهای کیهانی پرانرژی بر اثر میدان مغناطیسی زمین انحراف کمی پیدا می‌کنند در حالی که پرتوهای کیهانی کم‌انرژی در میدان مغناطیسی زمین انحراف زیادی دارند و مسیر حرکتشان بسیار پیچیده می‌شود و هیچ توصیف تحلیلی خاصی برای آن‌ها بیان نشده است.

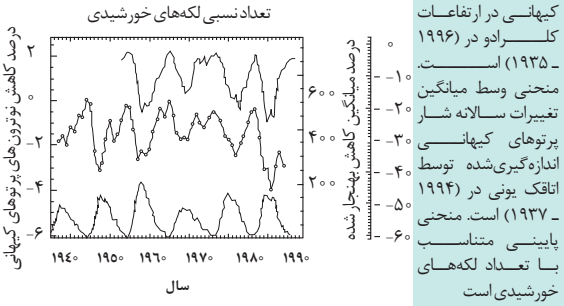


شکل ۱۲: شکل شماتیکی از اثر میدان مغناطیسی اطراف زمین بر روی پرتوهای کیهانی

علاوه بر فعالیت‌های خورشیدی و میدان مغناطیسی زمین، شدت تابش کیهانی به طول و عرض جغرافیایی و زاویهٔ سمتی نیز بستگی دارد (وابستگی به طول جغرافیایی از این حقیقت ناشی می‌شود که محور دوقطبی مغناطیسی زمین با محور دوران زمین موازی نیست). همچنین شار کیهانی از جهت‌های شرقی و غربی به علت قطبش میدان وابسته به جاذبهٔ زمین و غلبهٔ بارهای مثبت در پرتوهای کیهانی اولیه متفاوت است که به اصطلاح به آن اثر شرقی ـ غربی می‌گویند. شدت پرتوهای کیهانی در خط استوا کمتر از قطب‌هاست، زیرا مقدار cut off در استوا بیشتر است؛ علت آن هم این است که ذرات باردار تمایل دارند در جهت خطوط میدان حرکت کنند، از این‌رو خطوط میدان به سمت زمین خم می‌شوند. تمام موارد بالا روی شدت تابش کیهانی تأثیر می‌گذارند.

تغییرات شار پرتوهای کیهانی در بالای اتمسفر

یک وابستگی بین شدت پرتوهای کیهانی در انرژی‌های کمتر از ۱۰GeV با فعالیت‌های خورشیدی وجود دارد. اگر فعالیت‌های خورشیدی ثابت بود، شار پرتوهای کیهانی کهکشان ما نیز ثابت می‌شد، ولی به خاطر فعالیت‌های خورشیدی شار پرتوهای کیهانی تغییر می‌کند. بادهای خورشیدی مربوط به فعالیت‌های خورشیدی که هر یازده سال یک بار اتفاق می‌افتند پلاسمای مغناطیسی‌ای را که خورشید به وجود می‌آورد گسترش می‌دهند که باعث کاهش سرعت ذرات ورودی می‌شود. به خاطر ساختار میدان مغناطیسی، تنها برخی از پرتوهای کیهانی کهکشان ما به داخل منظومه شمسی نفوذ می‌کنند و آن به‌صورت یک محافظ عمل می‌کند. وقتی فعالیت‌های خورشیدی زیاد است، این محافظ قوی‌تر است و پرتوهای کیهانی کمتری به سطح زمین می‌رسد، و وقتی فعالیت‌های خورشیدی کمتر است، محافظ ضعیف‌تر است و پرتوهای کیهانی بیشتری به زمین می‌رسند. در شکل زیر شار پرتوهای کیهانی با توجه به فعالیت‌های خورشیدی مشخص شده است.



شکل ۱۳: منحنی بالایی شار نوترون پرتو کیهانی در ارتفاعات کلرادو در (۱۹۹۶ ـ ۱۹۳۵) است. منحنی وسط میانگین تغییرات سالانه شار پرتوهای کیهانی اندازه‌گیری‌شده توسط اتاقک یونی در (۱۹۹۴ ـ ۱۹۳۷) است. منحنی پایینی متناسب با تعداد لکه‌های خورشیدی است

در نهایت ذرات پرتوهای کیهانی توسط میدان مغناطیسی زمین منحرف و در اتمسفر جذب می‌شوند، و چون انرژی کافی برای یونیزه کردن گازهای مختلف در بالای اتمسفر را دارند باعث سپیده‌دم زیبایی می‌شوند. در نیمکره شمالی به آن شفق شمالی و در نیمکره جنوبی به آن شفق جنوبی می‌گویند. این پرتوهای کیهانی کم‌انرژی را نمی‌توان به وسیلهٔ آشکارسازهای ذرات در سطح زمین آشکارسازی کرد. در فیلم شماره ۷ هم می‌توانید نمای زیبایی از شفق قطبی را از دید ساکنان ایستگاه فضایی در خارج از اتمسفر ببینید.

https://www. roshdmag. ir/u/20h

پی‌نوشت‌ها

1. Henri Becquerel
2. Wilson
3. Theodor Wulf
4. Domenico Pacini
5. Victor Hess
6. Werner Kolhorster
7. Robert Milikan
8. Dimitr Skobelzyn
9. Bruno Rossi
10. Geiger
11. Hideki Yukawa
12. Van Allen
13. Gottlieb
14. Pierre Auger
15. Homi J.Bhabha
16. Albert Einsten
17. Knee
18. Ankle
19. photographic emulsions
20. cloud chambers
21. Geiger-Muller counters
22. Frank McDonald