

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده فیزیک

پایان نامه تحصیلی برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

رشته فیزیک گرایش نجوم

خوشه گیسو به عنوان منشا پرتوهای کیهانی فراکاهشانی

مؤلف:

ساره شفیعی

استاد راهنما:

دکتر سید جلیل الدین فاطمی

استاد مشاور:

دکتر حمید ارجمند کرمانی

دیماه ۱۳۹۳

تقدیم به:

پدر و مادر عزیزم که همواره حامی من بودند و همسر مهربانم که حضورش مایه‌ی دلگرمی من برای ادامه‌ی مسیر زندگی‌م بوده است.

و همچنین پسر م‌محمد مهدی که با داستان کوچک و مهربان خود از هیچ کمکی دریغ نکرد.

و به ویژه دوقلوها (محمد هادی و زهرا) که حداکثر تلاش خود را جهت به تأخیر انداختن این تألیف به کار بردند!

تشکر و قدردانی:

حمد و سپاس خدای را که در تمامی لحظات زندگی یار و یاور من بوده است.

صمیمانه ترین سپاس های خود را تقدیم می کنم به استاد راهنمای گرانقدرم جناب آقای دکتر فاطمی که در این کار مرا یاری نمودند.

چکیده:

بیشتر اطلاعات ما از جهان پیرامون با استفاده از طیف الکترومغناطیسی صورت می‌گیرد. البته امروزه بررسی و آشکارسازی نوترینوهای موجود در کیهان شاخه‌ی جدیدی از بررسی جهان می‌باشد که هنوز در حال توسعه است.

گستره‌ی طیف امواج الکترومغناطیسی از امواج بسیار کم انرژی مثل تابش میکروموجی زمینی کیهان $2/3 \times 10^{-4} eV$ تا امواج بی نهایت پرانرژی $10^{20} eV$ است.

آخرین قسمت این طیف پرتوهای گاما است که این پرتوها در بین امواج الکترومغناطیسی کوتاه‌ترین طول موج و در نتیجه بیشترین بسامد و انرژی را دارا می‌باشند.

منشأ پرتوهای کیهانی به ویژه در مورد بالاترین گستره‌ی انرژی آن‌ها پس از گذشت حدود صد سال از کشف آن‌ها مورد سوال می‌باشد و آیا این پرتوها دارای منشأ کهکشانی هستند یا فراهکشانی؟

هدف از این پایان نامه بررسی خوشه‌ی گیسو به عنوان یک منشأ پرتوهای کیهانی فراهکشانی و پاسخ به این سوال است که آیا می‌توان خوشه‌ی گیسو را به عنوان یک منشأ برای پرتوهای کیهانی در نظر گرفت یا خیر.

در تحقیق حاضر به کمک طیف گاما، شدت فراهکشانی و اضافه شار پرتوهای گامای کهکشانی حاصل از خوشه‌ی گیسو در ربع سوم محاسبه می‌شود. برای حذف اثرخوشه سنبله در این ربع داده‌های تجربی بامدل‌های نظری A و B مقایسه می‌شوند و توافق بین طیف تجربی و مدل B از خوشه سنبله حاصل می‌شود. در نهایت شارگامای خوشه‌ی گیسو برای انرژی‌های 30 MeV تا 100 GeV بدست می‌آید و نتیجه‌گیری می‌شود که حدود 18/24 درصد از شارکل مشاهده شده در ربع سوم از جهت خوشه‌ی گیسو ساطع می‌شود. ضمناً با توجه به مشخصه خوشه‌ی گیسو که دارای کهکشان‌هایی با هسته فعال کهکشانی است، امروزه بهترین نامزد منشأ پرتوهای کیهانی بسیار پر انرژی به شمار می‌آید.

کلیدواژه: پرتوهای گاما، پرتوهای کیهانی، شدت فراهکشانی، اضافه شار، خوشه‌ی گیسو، خوشه سنبله.

فهرست مطالب:

شماره صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۵	فصل دوم: پرتوهای کیهانی و پرتوهای گاما و منابع آن ها
۶	۱-۲- پرتوهای کیهانی
۸	۲-۲- منابع پرتوهای کیهانی
۱۰	۳-۲- گستره‌ی پرتوهای گاما
۱۰	۴-۲- مکانیسم‌های تولید خطوط پرتوهای گاما
۱۰	۱-۴-۲- نابودی جفت الکترون- پوزیترون
۱۱	۲-۴-۲- واکنش‌های گیراندازی نوترون
۱۱	۳-۴-۲- برخورد پرتوهای کیهانی با محیط میان ستاره‌ای
۱۳	۴-۴-۲- سطوح لاندائو
۱۴	۵-۲- طیف پیوسته‌ی پرتوهای گاما
۱۴	۱-۵-۲- الکترون‌ها
۲۲	۲-۵-۲- پروتون‌ها
۲۶	۶-۲- منابع تولید پرتوگاما
۳۰	۷-۲- منابع شار پرتوهای گامای فراکاهشانی پخش شده

۳۲	فصل سوم: خوشه‌های کهکشانی
۳۳	۱-۳- خوشه‌ی کهکشانی
۳۴	۲-۳- مقایسه‌ی خوشه‌های کهکشانی سنبله و گیسو
۳۶	۳-۳- مطالعه میدان مغناطیسی خوشه‌های کهکشانی سنبله و گیسو
۳۹	۴-۳- سایر تحقیقات انجام یافته درباره‌ی خوشه‌های کهکشانی گیسو و سنبله
۴۳	۵-۳- مطالعه‌ی داده‌های EGRET
	فصل چهارم: آنالیز داده‌های ماهواره‌ی ای و نتایج بدست آمده برای خوشه‌ی
۴۷	کهکشانی گیسو
۴۸	۱-۴- مقدمه
۵۵	۲-۴- محاسبه‌ی اضافه‌ی شار پرتوهای گامای گیسو در ربع سوم
۵۶	۳-۴- محاسبه‌ی مازاد شار پرتو گاما از جهت دیگر خوشه‌ی کهکشانی در راستای گیسو
۵۷	۴-۴- مطالعه‌ی سهم فرآیند وارون کامپتون در بررسی پرتوهای گاما
۶۰	۵-۴- مدل‌های تئوری برای حذف اثر خوشه‌ی کهکشانی سنبله
۶۴	۶-۴- محاسبه‌ی اضافه‌ی شار پرتو گاما در ربع سوم ناشی از خوشه‌ی سنبله و گیسو
۶۶	۷-۴- نتایج
۶۸	منابع

فصل اول:

مقدمه

نجوم یکی از چند علمی است که به مطالعه‌ی طبیعت می‌پردازد. بی‌آن که از وسیله‌ای استفاده شود، می‌توان چیزهای بسیاری را فراگرفت و به اکتشافات مهمی دست یافت. آسمان آزمایشگاه نجوم است و موقع کار، هر شیئی که صاف و شفاف باشد. البته دیدی که تلسکوپ از آسمان میسر می‌سازد، بسیار واضح‌تر و هیجانی‌تر که پدید می‌آورد بی‌اندازه است. چشم‌اندازی کاملاً تازه در برابر آدمی گشوده می‌شود و مرزهای آسمان وسیع‌تر می‌شوند به طوری که راصد به عمق بیشتری در آسمان دست می‌یابد. کهکشان که قبلاً با چشم غیر مسلح به زمینه‌ای سفید و نازک می‌مانست به تعداد نامحدودی ستاره‌ی رنگارنگ تفکیک می‌شود و اشکال هندسی متنوعی را می‌سازد.

ستاره‌ها و سایر اجرام آسمانی تنها اشعه‌ی مرئی (نور) گسیل نمی‌کنند، بلکه تابش‌هایی با طول موج کوتاه‌تر (پرتو ایکس) و بلندتر (گرما و امواج رادیویی) نیز از آن‌ها ساطع می‌شود. اما جو زمین فقط نسبت به نور و امواج رادیویی شفاف است. تمام اشعه‌های دیگری که توسط ستارگان گسیل می‌شود به ما نمی‌رسد زیرا که بخش اعظم آن به وسیله‌ی جو جذب می‌شود. بیشتر اطلاعات ما از جهان پیرامون با استفاده از طیف الکترومغناطیسی صورت می‌گیرد. البته امروزه بررسی و آشکارسازی نوترینوهای موجود در کیهان شاخه‌ی جدیدی از بررسی جهان می‌باشد که هنوز در حال توسعه است.

گستره‌ی طیف امواج الکترومغناطیسی از امواج بسیار کم انرژی مثل تابش میکروموجی زمینه‌ی کیهان $2/3 \times 10^{-4} eV$ تا امواج بی‌نهایت پرانرژی $E \sim 10^{20} eV$ می‌باشد. هر قسمت از این طیف الکترومغناطیسی با استفاده از ابزار مناسب خود آشکارسازی می‌شود. مثلاً چشم انسان یک نوع آشکارساز است که امواج محدوده مرئی (از قرمز $700 \text{ nm} \sim \lambda$ تا بنفش $400 \text{ nm} \sim \lambda$) را آشکارسازی می‌کند.

آخرین قسمت این طیف پرتوهای گاما می‌باشد. این پرتوها در بین امواج الکترومغناطیسی کوتاه‌ترین طول موج و در نتیجه بیشترین بسامد و انرژی را دارا می‌باشند. بررسی جهان از منظر پرتوهای گاما، نجوم گاما نام دارد. در نجوم انرژی‌های زیاد پرتوگاما به پرتوهایی با انرژی‌های تقریباً از مرتبه یا بیش از چند میلیون الکترون ولت ($E \geq \text{MeV}$) اطلاق می‌شود حتی خط $0/511 \text{ MeV}$ که ناشی از نابودی الکترون - پوزیترون است ($e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$) نیز در این ناحیه بررسی می‌شود [۶].

منابع تولید پرتوگاما به دو دسته تقسیم می‌شوند که هر کدام از این منابع نیز خود شامل دو بخش کهکشانی و فرا کهکشانی می‌باشند [۹] و [۱۰].

تقریباً ۲۷۱ چشمه‌ی تابش گامای متمرکز با انرژی‌های بیشتر از 100 MeV شناخته شده است که ۸ چشمه از اینها در انرژی‌های بیشتر از 300 GeV قرار دارند [۱۱]. از این تعداد چشمه ۱۰۱ چشمه شناخته شده می‌باشد و شامل هسته‌های فعال کهکشانی و انفجارهای تابش گاما و بقایای ابرنواختری و سیاه چاله‌های کهکشانی و پالسارها می‌باشند.

ماهیت ۱۷۰ چشمه دیگر به طور قطعی معلوم نیست دو سوم از این چشمه‌های ناشناخته در نزدیکی صفحه‌ی کهکشان قرار دارند [۱۲]. چشمه‌های با عرض کهکشانی زیاد در حدود ۵۰ عدد هستند و می‌توانند چشمه‌های کهکشانی که درون هاله کهکشان قرار دارند [۱۶] و یا چشمه‌های که در خارج کهکشان قرار دارند مثل بلازارها، هسته‌های فعال کهکشانی و خوشه‌های کهکشانی باشند [۱۷]. گستره‌ی پرتوهای گاما بر حسب انرژی به چند قسمت تقسیم بندی می‌شود. به عنوان مثالی از منابع پرتوهای کیهانی با انرژی بالا می‌توان به کوازارها و خوشه‌های کهکشانی اشاره کرد.

در این تحقیق به ویژه به مطالعه میدان مغناطیسی خوشه‌ها می‌پردازیم، زیرا جهت پرتوهای کیهانی به علت حضور میدان‌های مغناطیسی دستخوش انحراف نسبت به منبع تولید آنها می‌شود و یا حتی اعتقاد بر این است که پرتوهای بسیار پرانرژی می‌تواند مرتبط با میدان‌های مغناطیسی سیاه چاله‌ها و یا هسته‌های فعال کهکشانی باشد.

قسمت بیشتر اطلاعات پرتوهای گاما که اخترشناسان از آنها استفاده کرده و می‌کنند بر اساس داده‌های ماهواره‌های SAS-II^1 و Cos-B^2 است. همچنین EGRET^3 که سوار بر رصدخانه پرتوی گاما CGRO^4 می‌باشد بخش قابل توجهی از طیف گاما را مورد بررسی قرار داده است. این ماهواره تابش‌های متمرکز و پخش شده پرتوهای گاما را در محدوده انرژی $30 \text{ MeV} - 100 \text{ GeV}$ آشکار کرده است.

در حال حاضر مؤثرترین ماهواره، ماهواره اروپایی انتگرال^۵ است که در سال ۲۰۰۲ به فضا پرتاب شد. به علت دقیق بودن نتایج ماهواره‌ی EGRET این نتایج مرجع کارهای اخترشناسان از جمله نتایج بدست آمده در آزمایش‌های تابش گاما با انرژی‌های فوق العاده زیاد است. بررسی‌های انجام گرفته بر روی پرتوهای کیهانی بسیار پر انرژی (انرژی‌های 10^{16} eV) نشان می‌دهد که این ذرات را می‌توان دارای منبع ماورا کهکشانی در نظر گرفت.

¹ Small Astronomy Satellite

² Cosmic Ray Satellite-B

³ Energetic Gamma Ray Experiment Telescope

⁴ Compton Gamma Ray Observatory

⁵ International Gamma Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL)

فرض عمومی بر این است که منشأ بیشتر این ذرات (که بر روی زمین آشکار می شوند) خوشه‌ی سنبله است [۲۹]، اما خوشه‌های دورتر نیز می‌توانند منشأ ذرات کیهانی بسیار پرانرژی باشند. این ذرات اساساً در نواحی مرکزی خوشه‌های کهکشانی تولید می‌شوند و به این ترتیب ذرات کیهانی به سمت خارج با ضریب پخشی تابع انرژی، پخش می‌شوند. پرتوهای گامای ثانویه، از برهمکنش‌های این ذرات با تابش زمینه‌ی میکروموج کیهانی تولید شده و ممکن است بر روی زمین آشکار شوند.

در این تحقیق در فصل ۲ به بررسی پرتوهای کیهانی، پرتوهای گاما و منابع آنها خواهیم پرداخت و طیف انرژی آنها را مطالعه می‌کنیم. در فصل ۳ به بیان مشخصات خوشه‌های کهکشانی خواهیم پرداخت و خواص خوشه کهکشانی سنبله و گیسو را به عنوان دو منبع اصلی پرتوهای کیهانی بررسی می‌کنیم. در فصل ۴ به آنالیز داده‌های تجربی مربوط به خوشه سنبله و محاسبه طیف حاصل از آن پرداخته و با مقایسه با داده‌های تجربی نشان داده شده است بین طیف تجربی انرژی گاما با مدل B خوشه‌ی سنبله توافقی کاملاً واضح وجود دارد. همچنین خوشه‌ی گیسو به عنوان منشأ احتمالی پرتوهای کیهانی فوق‌العاده پر انرژی مورد بررسی قرار گرفته است و نتیجه‌گیری شده است که این خوشه نیز علاوه بر خوشه‌ی سنبله می‌تواند منشأ پرتوهای کیهانی بسیار پرانرژی باشد.

فصل دوم:

پرتوهای کیهانی و پرتوهای گاما و
منابع آن ها

۲-۱- پرتوهای کیهانی:

پرتوهای کیهانی ذرات نسبیتی و اغلب بارداری مثل پروتون ها و هسته های سنگین تر هستند که از تمام جهت ها به سطح زمین می‌رسند.

پرتوهای کیهانی که منشأ اختر فیزیکی دارند پرتوهای کیهانی اولیه هستند، وقتی این پرتوها به مواد بین ستاره ای برخورد می کنند پرتوهای کیهانی ثانویه را تولید می کنند.

در گستره‌ی انرژی‌های پایین تقریباً ۹۰٪ پرتوهای کیهانی از پروتون ها و ۹٪ هسته هلیوم و ۱٪ را الکترون تشکیل می دهد.

پرتوهای کیهانی پرنانرژی غالباً در چشمه های خارج از منظومه شمسی تولید می شوند.

پرتوهای کیهانی به دلیل بارداری بودن در میدان های مغناطیسی کهکشانی و بین کهکشانی منحرف می شوند و جهت اولیه خود را از دست می دهند، بنابراین نمی توان با استفاده از جهت این پرتوها جهت منبع تولید کننده آنها را شناخت مگر در انرژی‌های بسیار بالا، یعنی ذراتی که انرژی آنها بیش از 10^{19} eV (تقریباً ۱J) است. البته با توجه به این که این پرتوهای پرنانرژی در مسیرهای تقریباً مستقیمی حرکت می کنند اما منشأ آنها هنوز دارای ابهام‌هایی است.

در سال ۱۹۰۹ ولف^۱ با استفاده از یک الکتروسکوپ نشان داد میزان تشعشعات در بالای برج ایفل نسبت به سطح زمین دارای افزایش می باشد.

در سال ۱۹۱۲ ویکتور هس^۲ سه الکتروسکوپ را توسط یک بالن تا ارتفاع ۵۳۰۰ متری بالا برد و میزان یونیزاسیون را چهار برابر میزان آن در سطح زمین محاسبه کرد. پس از مطالعه میزان تشعشعات در یک خورشیدگرفتگی او نتیجه گرفت این تشعشعات از یک منبع بسیار قوی در بالای جو سرچشمه می گیرند و در سال ۱۹۳۶ جایزه‌ی نوبل را به دلیل کشفیات خود دریافت کرد [۱۰۲].

اصطلاح پرتوهای کیهانی توسط رابرت میلیکان^۳ در سالهای بین ۱۹۳۰-۱۹۲۰ ارائه شد و نظریه ای که بیان کرد به این شرح بود:

"پرتوهای کیهانی به دلیل همجوشی اتم های هیدروژن در محیط های بین ستاره ای تولید می شوند و همچنین در جو الکترون های ثانویه در اثر پراکندگی وارون کامپتون پرتوگاما بوجود می آورند."

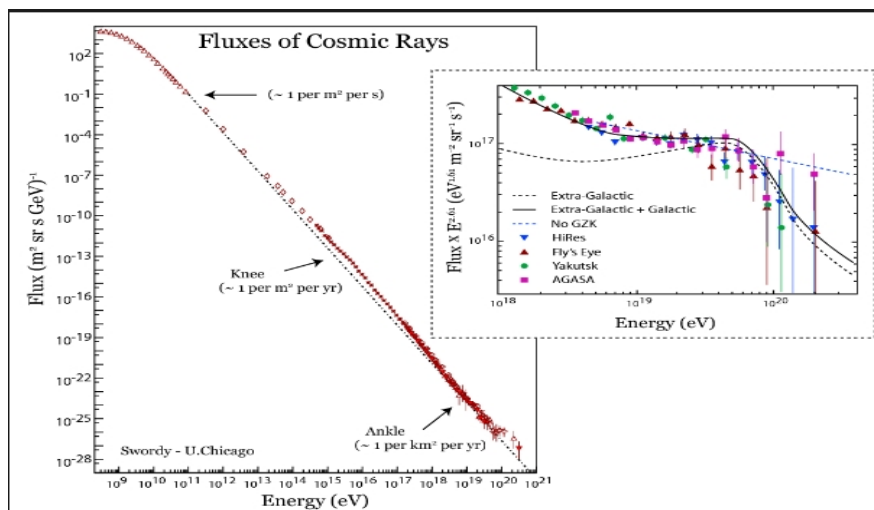
¹ wolf

² Victor Hess

³ Robert Milikan

اندازه‌گیری انرژی و جهت پرتوهای کیهانی برای اولین بار در سال ۱۹۵۴ توسط اعضای گروه «روسی»^۱ در ماساچوست انجام شد. در نهایت، پروژه اوژه برای مطالعه خواص و جهت ورود پرتوهای کیهانی اولیه پر انرژی راه اندازی شد و در سال ۲۰۰۷ اولین نتایج اعلام شد. این نتایج بیان می‌دارند که منشأ پرتوهای کیهانی پر انرژی از جهت هسته‌های فعال کهکشانی^۲ می‌باشد، جایی که معتقدیم پروتون‌ها تا انرژی های 10^{20} eV و حتی بالاتر توسط میدان‌های مغناطیسی قوی مرتبط با سیاه چاله‌های بزرگ مرکزی یا هسته های فعال کهکشانی شتاب می‌گیرند. در سال ۱۹۶۷ مطالعه گامای کیهانی توسط ماهواره $OSO-3$ ^۳ منابع پرتوهای کیهانی در داخل و خارج کهکشان به طور جداگانه شناسایی شدند و نقشه گامای آسمان ترسیم شد. طیف انرژی پرتوهای کیهانی از یک قانون توانی پیروی می‌کند که در گستره‌ی انرژی حدود $(10^{10} - 5 \times 10^{15})$ eV که به زانوی طیف موسوم است اندیس طیف $2/7$ ($dE/dN \sim E^{-2/7}$) و بالاتر از 5×10^{18} eV که قوزک نامیده می‌شود اندیس طیف برابر $3/0$ است و به این ترتیب کاهش شار با افزایش انرژی شدیدتر خواهد شد [۳].

در شکل ۲-۱ ویژگی‌های طیف قابل مشاهده است و کمی شار این پرتوها واضح می‌باشد. تا حدی که در نزدیکی قوزک یک ذره بر کیلومتر مربع در سال آشکارسازی می‌شود و نهایتاً در اطراف 10^{20} eV نرخ رخداد به یک ذره در هر کیلومتر مربع در قرن اتفاق می‌افتد. همچنین در این شکل طیف انرژی پرتوهای کیهانی برای انرژی‌های بسیار بالا ($E > 10^{18}$ eV) به طور جداگانه نیز آمده است.

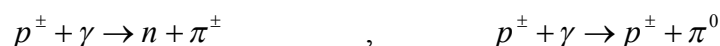


شکل ۲-۱- طیف انرژی پرتوهای کیهانی همچنین برای انرژی‌های بالا این طیف بطور جداگانه آمده است.^۴

¹ Rossi
² Active Galactic Nucleus
³ Orbiting Solar Observatory
⁴ [Http://inspirehep.net/record/835645/plots](http://inspirehep.net/record/835645/plots)

۲-۲- منابع پرتوهای کیهانی:

تنوع انرژی ذرات کیهانی نشان دهنده تنوع گستردگی منابع آنهاست در شکل ۲-۲ این منابع برحسب انرژی به دو بخش کهکشانی و فراکهکشانی تقسیم شده اند. این منابع کلاً از ستاره های نوترونی گرفته تا لکه های خورشیدی و هسته های فعال کهکشانی و کوازارها، باقیمانده های ابر نواختر، دیسک و هاله کهکشان و خوشه های کهکشانی را شامل می شود با این حال هنوز بخش های زیادی از این منابع ناشناخته می باشد. عموماً حدس زده می شود که در انرژی های نزدیک زانو و بالاتر پرتوهای کیهانی در بقایای ابر نواختری^۱ تولید می شوند. برای نواحی بالاتر از زانو یعنی محدوده های بالاترین انرژی ها مدل^۲ GZK مطرح می شود [۴]، که بیان می کند در انرژی های بالاتر از زانو پرتوهای کیهانی با تابش زمینه میکروموجی کیهان برهم کنش کرده و تولید پایون می کنند.



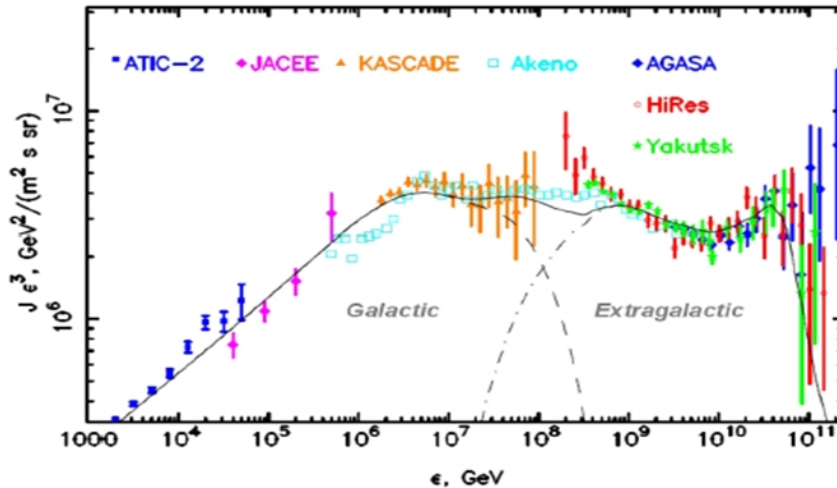
و به این ترتیب انرژی و شار آنها به ما نمی رسد به این اثر، نقطه قطع GZK می گویند. مشاهدات آگاسا^۳ نشان داده اند که پرتوهای کیهانی حتی با انرژی های بیشتر هم آشکار شده اند. همچنین پرتوهای کیهانی با انرژی بسیار بالا که منشأ فراکهکشانی دارند به خوشه های کهکشانی نسبت داده می شوند که در فصل ۳ به آن ها پرداخته می شود.

مکانیسم های تولید پرتوهای کیهانی تا حدودی ناشناخته است به این دلیل که میدان های مغناطیسی کهکشان ما و سایر کهکشان ها ، جهت این پرتوها را منحرف می کند و نمی توان منشأ این پرتوهای را که از تمام جهات جو زمین را بمباران می کنند به راحتی تشخیص داد. این منابع قابلیت باز تولید در آزمایشگاه های زمین را ندارند اگر چه LHC (شتاب دهنده بزرگ هادرونی) در سرن در حال حاضر پروتون ها را تا بالای ۷ TeV شتاب می دهد با این حال این انرژی بسیار پایین تر از انرژی های سیستم های اختر فیزیکی با انرژی های بالاتر از 10^{20} eV است.

¹ - Super Nova Remnants

² Greisen – Zatspin - Kuzmin

³ Akeno Giant Air Shower Array (AGASA)

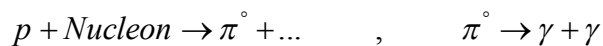


شکل ۲-۲- نواحی انرژی پرتوهای کیهانی کهکشانی و فراکهکشانی^۱

یکی از اساسی‌ترین سوالات اخترفیزیک مکانیسم‌های شتاب‌دهی و مکان‌های شتاب‌دهی پرتوهای کیهانی تا این انرژی‌های فوق‌العاده زیاد و بویژه ابهام منشأ کهکشانی و ماوراء کهکشانی آنهاست. در مورد شتاب‌دهنده‌های کهکشانی می‌توان در منظومه شمسی به مکانیسم‌های شتاب‌دهی تا انرژی‌های KeV تا MeV به امواج ضربه‌ای^۲ بین سیاره‌ای اشاره کرد. در فوران‌های خورشیدی نوکلئون‌ها تا انرژی‌های حدود GeV شتاب می‌گیرند و نوترون‌های پر انرژی تولید می‌کنند [۵].

همانطور که گفته شد به علت میدان‌های مغناطیسی مشاهده‌ی چشمه‌های پرتوهای کیهانی امکان پذیر نیست. تنها راه دنبال کردن پرتوهای کیهانی نگاه کردن به ذرات خنثی پایدار ثانویه‌ای است که به وسیله برخورد ذرات پرتوهای کیهانی شتاب‌دار با هسته‌های دیگر به وجود می‌آید. این برخوردها می‌توانند در محیط‌های میان ستاره‌ای رخ دهد. بنابراین مناسب‌ترین راه برای جستجوی این چشمه‌ها بررسی پرتوهای گامای ثانویه‌ای است که توسط این ذرات باردار پر انرژی تولید می‌شوند.

فرآیند غالب تولید پرتوهای گاما به صورت:



است.

^۱www. CR measurements; Assembled by Voelk et al. (2007)

^۲- Shock Wave

پرتوهای گاما و پرتوهای کیهانی همبستگی تنگاتنگی با هم دارند. پس در ادامه به مطالعه گستره پرتوهای گاما و مکانیسم ها و منابع تولید پرتوی گاما می پردازیم.

۲-۳- گستره‌ی پرتوهای گاما:

گستره‌ی پرتوهای گاما به صورت زیر تقسیم بندی می شود: [۵]

- ۱- تابش گامای کم انرژی^۱ که گستره‌ی آن از ۰/۵ MeV تا ۱۰ MeV است.
- ۲- تابش گامای با انرژی متوسط^۲ که گستره‌ی آن از ۱۰ MeV تا ۳۰ MeV است.
- ۳- تابش گامای انرژی های زیاد^۳ که گستره‌ی آن از ۳۰ MeV تا ۱۰ GeV است.
- ۴- تابش گامای انرژی های خیلی زیاد^۴ که گستره‌ی آن از ۱۰ GeV تا ۱۰۰ TeV است.
- ۵- تابش گامای انرژی های ما فوق انرژی^۵ که گستره‌ی آن از ۱۰۰ TeV تا ۱۰۰ EeV است.
- ۶- تابش گامای انرژی های فوق العاده زیاد^۶ که انرژی های بیش از ۱۰۰ EeV است.

بر اساس طیفی که پرتوهای گاما دارند می توان مکانیسم تولید این پرتوها را به دو دسته زیر تقسیم بندی کرد:

الف) مکانیسم های تولید خطوط پرتوهای گاما

ب) طیف پیوسته پرتو گاما

۲-۴- مکانیسم های تولید خطوط پرتوهای گاما:

مکانیسم های تولید خطوط پرتوهای گاما شامل نابودی جفت الکترون- پوزیترون، واکنش های گیر اندازی نوترون، برخورد پرتوهای کیهانی با محیط میان ستاره ای می شوند.

۲-۴-۱- نابودی جفت الکترون - پوزیترون:

همانطور که گفته شد در نجوم انرژی های زیاد پرتو گاما به پرتوهایی با انرژی های تقریباً از مرتبه یا بیش از چند میلیون الکترون ولت ($E \geq \text{MeV}$) اطلاق می شود.

معروف ترین خط نابودی در برهم کنش در حال سکون الکترون - پوزیترون رخ می دهد و خط 0.511 MeV با فرآیند، $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$ نتیجه می شود [۶].

¹- Low Energy Gamma Ray

²- Medium Energy Gamma Ray

³- High Energy Gamma Ray

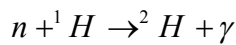
⁴- Very High Energy Gamma Ray

⁵- Ultra High Energy Gamma Ray

⁶- Extremely HighEnergy Gamma Ray

۲-۴-۲- واکنش‌های گیراندازی نوترون:

در واکنش:



نوترون‌های حرارتی پرتوهای گامایی با انرژی ۲/۲۲MeV تولید می‌کنند. سطح مقطع گیراندازی به این صورت است. $7/3 \times 10^{-20} \text{ v}^{-1} \text{ cm}^2$ که v سرعت نوترون بر حسب cm s^{-1} می‌باشد. برای رخ دادن چنین واکنشی باید ${}^1_0\text{nuclei cm}^{-3} > 1/4 \times 10^{16}$ باشد، که n_H چگالی هیدروژن است. پس این واکنش‌ها در حالت‌های نسبتاً چگال رخ می‌دهند. بنابراین نوترون‌های آزاد تولید شده در عمق چگال ستارگان و یا در فوران‌های خورشیدی در معرض گیراندازی قرار می‌گیرند در حالی که نوترون‌های تولید شده عموماً در ماده بین ستاره‌ای قبل از اینکه گیر انداخته شوند واپاشی می‌کنند.

سطح مقطع برای پراکندگی الاستیک نوترون‌ها در هیدروژن از مرتبه 10^{-23} cm^2 است که خیلی از سطح مقطع گیراندازی نوترون (بجز نوترون‌های با سرعت خیلی پایین) بزرگتر است. از این رو موقعی که نوترون‌ها فقط انرژی حرارتی دارند، انرژی‌شان را سریعاً در برخوردهای الاستیک از دست می‌دهند و گیر می‌افتند. نوترون‌ها از برخورد پرتون‌های پر انرژی با مواد اطراف خود به وجود می‌آیند و بعداً به وسیله برخوردهای مکرر با هیدروژن حرارتی می‌شوند. گیراندازی نوترون بوسیله هسته‌ها منجر به هسته‌های مرکبی می‌شوند که وقتی واپاشی می‌کنند پرتوگاما تولید می‌کنند. در این مورد به ویژه گیراندازی نوترون‌ها به وسیله ${}^{56}\text{Fe}$ که منجر به ${}^{57}\text{Fe}$ می‌شود و گسیل پرتوهای گاما در انرژی‌های ۷/۶۴۶ MeV و ۷/۶۳۲ رخ می‌دهد. عقیده بر این است که در نواحی سطح ستارگان نوترونی آهن زیادی وجود داشته باشد و بالقوه محل‌های مهمی برای رخ دادن فرآیندهای فوق می‌باشند [۶].

۲-۴-۳- برخورد پرتوهای کیهانی با محیط میان ستاره‌ای:

وقتی پرتوهای کیهانی با ماده بین ستاره‌ای (ISM)^۱ از قبیل اکسیژن برخورد می‌کنند مهم است که بتوانیم شار گاما‌های تولید شده را محاسبه کنیم. سطح مقطع برای ${}^{16}\text{O}$ و ${}^{12}\text{C}$ به صورت تابعی از انرژی جنبشی پروتون در شکل ۲-۳ نشان داده شده است. با توجه به شکل دیده می‌شود پروتون‌هایی در گستره انرژی ۸-۳۰ MeV تأثیر گذارتر هستند که سطح مقطع پراکندگی‌شان در حدود $100 \text{ mb}^2 \approx \sigma$ است.

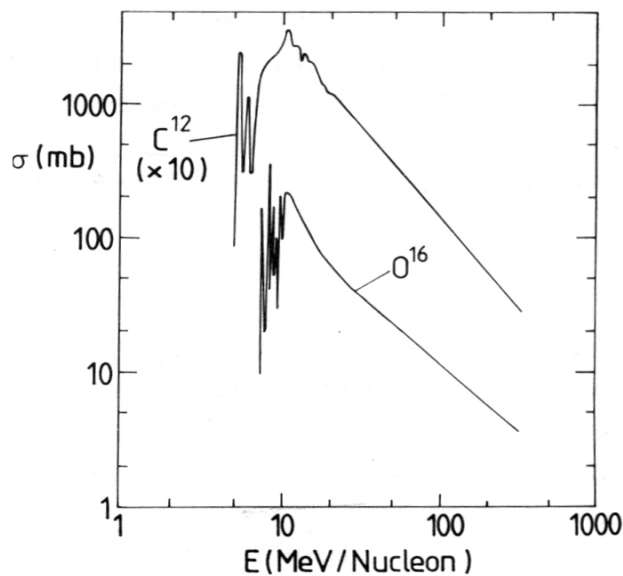
^۱ Interstellar Medium

^۲ $1 \text{ mb} = 1 \text{ millibarn} = 10^{-31} \text{ m}^2$

شدت پروتون در محیط بین ستاره‌ای در این محدوده انرژی نامعلوم است اما اگر مقدار $2 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ در نظر گرفته شود و فرض می‌شود فراوانی اکسیژن 7×10^{-4} برابر هیدروژن است. پس می‌توان گفت در نواحی بین ستاره‌ای که چگالی گاز 1 cm^{-3} می‌باشد تعداد اتم‌های اکسیژن که می‌توان برانگیخته شوند $2 \times 10^{-27} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$ می‌شود [۶].

اگر هر اتم اکسیژن برانگیخته با انتشار یک خط پرتوگاما به یک اتم پایدار تبدیل شود در نتیجه در طول مسیر 10 kpc می‌توان شار $5 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-3} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ را انتظار داشت که این شار بسیار پایین است یعنی فقط یک پرتوگاما در یک روز در سطح 100 cm^2 و زاویه $1/60 \text{ sr}$ رانتهی می‌دهد در صورتی که شار پرتوگاما در صفحه کپکشانی به صورت قوی می‌باشد [۶].

جزئیات محاسباتی که ذکر شد توسط منگری^۱ و ریوز^۲ در سال ۱۹۷۵ و راماتی^۳ در سال ۱۹۷۹ انجام شده است [۷].



شکل ۲-۳- سطح مقطع برخورد که منجر به انتشار پرتوهای گاما می‌شود برای پروتون‌های ^{12}C و ^{16}O به صورت تابعی از انرژی جنبشی [۶].

¹ Meneguzzi
² Reeves
³ Ramaty