

# Analysis and Simulation of the Propagation of Cosmic Rays in the Fractal and Homogeneous Galactic Medium

## Summary

The energy spectrum of cosmic rays exhibits a power-law distribution, meaning there are more particles at lower energies and fewer particles at higher energies. There is a feature known as the knee at about  $3 \times 10^{15}$  eV in the energy spectrum of cosmic rays, and there is another feature called the ankle at about  $10^{18}$  eV. There are several models to explain the knee and ankle features in the energy spectrum of cosmic rays, such as, shock acceleration model, which suggests that the knee may be arise from the maximum energy that can be achieved through shock waves produced by supernova explosions, extragalactic sources model, which suggests that the ankle may be arise from the extremely energetic astrophysical sources outside our galaxy, and the propagation models, that we focus on in this research. Cosmic ray propagation has usually been assumed to be in a form of normal diffusion, which is a diffusion process with a linear relationship to time. But, in anomalous diffusion, the mean squared displacement of a particle has a non-linear relationship to time. In this research, we investigate the propagation of cosmic rays in the galactic medium. First, we simulate the trajectory of cosmic rays with the energy of  $10^{17}$  eV from the galactic center in two models of diffusion to show the differences between propagation in the homogeneous and fractal galactic medium. Simulations show that cosmic ray propagation in the galactic medium gives a greater galactic residence time and energy density for normal diffusion particles compared to anomalous diffusion particles. Here, the program, that is applied in this research, presents the results of a simulation using a model of the galactic magnetic field appropriate to the related medium. It uses the technique described in Clay et al. (2000) and Clay (2002). Normal cosmic ray diffusion assumes very simple properties of the structure of cosmic magnetic fields. A better approximation is to assume that the magnetic structure has fractal properties when modelling the propagation. Later, residence times of cosmic rays on a wide range of energy spectrum in the anomalous diffusion model are found. Results can correspond to Lagutin's point of view saying that the "knee" in the cosmic ray spectrum is the consequence of anomalous diffusion of the particles in the fractal galactic medium (Lagutin et al., 2001b). In other words, the "knee" may be caused by the extensive distances that cosmic ray particles can travel between inhomogeneities of magnetic fields and from the fact that a particle stays in a magnetic trap for a long time. Our study is useful for understanding the possibility that some spectral features (the knee and the ankle) of the spectrum of cosmic rays observed at Earth are induced by the fractal nature of the galactic medium.

**Keywords:** Normal diffusion, Anomalous diffusion, Cosmic rays, Fractal galactic medium, Galactic magnetic field.

# آنالیز و شبیه‌سازی انتشار پرتوهای کیهانی در محیط کهکشانی فراکتالی و همگن

حمید ارجمند کرمانی<sup>۱</sup> | انیسه فصیحی هرندی<sup>۲</sup>

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه نجوم، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه:

[harjomand@uk.ac.ir](mailto:harjomand@uk.ac.ir)

۲. گروه نجوم، کارشناسی ارشد، دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران. رایانامه: [anise.harandi@gmail.com](mailto:anise.harandi@gmail.com)

## چکیده

طیف انرژی پرتوهای کیهانی طبق توزیع قانون توانی و شامل دو خصوصیت به نام زانو و قوزک است. چندین مدل برای توصیف زانو و قوزک وجود دارد، مانند مدل شوک شتاب‌دهنده، مدل منابع فراکهکشانی، و مدل‌های انتشار که در اینجا به روی آنها تمرکز می‌کنیم. در این مقاله، ابتدا مسیر حرکت پرتوهای کیهانی با انرژی  $10^{17}$  eV را از مرکز کهکشان برای هر دو مدل پخش عادی و غیرعادی شبیه‌سازی کردیم، تا تفاوت انتشار در محیط همگن و محیط فراکتالی را نشان دهیم. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد، انتشار عادی پرتوهای کیهانی در محیط کهکشانی زمان اقامت طولانی‌تر و چگالی انرژی بیشتری نسبت به انتشار غیرعادی ارائه می‌دهد. در این مقاله از برنامه‌ای استفاده کردیم که انتشار پرتوهای کیهانی را در یک مدل ساده میدان مغناطیسی کهکشانی، مطابق با همان محیط، شبیه‌سازی می‌کند و از تکنیک‌های تعریف شده در کلی و همکاران (۲۰۰۰) و کلی (۲۰۰۲) استفاده شده است. سپس زمان اقامت کهکشانی ذرات با انرژی‌های مختلف را در انتشار غیرعادی به دست آوردیم. نتایج تطابق خوبی با نظر لاگوتین دارد. لاگوتین و همکاران (۲۰۰۱) ب عنوان می‌کند زانو ناشی از انتشار غیرعادی ذرات در محیط کهکشانی فراکتالی است. به عبارت دیگر، زانو می‌تواند به علت مسافت‌های آزاد طولانی پرتوهای کیهانی بین ناهمگنی‌های میدان‌های مغناطیسی در محیط کهکشانی باشد و همچنین از این حقیقت باشد که ذرات می‌توانند در این میدان‌های مغناطیسی به مدت طولانی به دام بیفتند. این مقاله برای فهم اینکه خصوصیات طیفی در طیف انرژی پرتوهای کیهانی می‌تواند ناشی از طبیعت فراکتالی محیط کهکشانی باشد، مفید خواهد بود.

**واژه‌های کلیدی:** انتشار عادی، انتشار غیرعادی، پرتوهای کیهانی، محیط کهکشانی فراکتالی، میدان مغناطیسی کهکشانی

## ۱. مقدمه

پرتوهای کیهانی ذرات باردار و پر انرژی هستند که از منابع خود به سمت ما می‌آیند و در این حین از میان میدان‌های مغناطیسی کهکشانی نیز گذر می‌کنند. چون این ذرات باردار هستند میدان‌های مغناطیسی روی آنها اثر گذاشته و جهت حرکت آنها را تغییر می‌دهند. طیف انرژی پرتوهای کیهانی هم از لحاظ انرژی و هم از لحاظ شار قابل توجه است. شار پرتوهای کیهانی با افزایش انرژی کاهش می‌یابد. یک افزایش تند شیب در محدوده انرژی  $3 \times 10^{15}$  eV معروف به زانو، وجود دارد و یک کاهش شیب در محدوده انرژی  $10^{18}$  eV معروف به قوزک، وجود دارد (ارلیکین، ۱۹۹۵؛ کستلینا، ۲۰۰۱؛ ابوزیاد و همکاران، ۲۰۰۱). انتشار پرتوهای کیهانی را معمولاً به صورت انتشار

عادی در نظر می‌گیرند، که یک روند انتشاری است که با زمان رابطه خطی دارد و همگن است. این انتشار توسط یک توزیع فضایی گوسی ذرات در اطراف یک منبع تعریف می‌شود (گینزبرگ و سیرواتسکی، ۱۹۶۴؛ برزینسکی و همکاران، ۱۹۹۰). اگرچه، فرض انتشار عادی به راحتی شار پرتوهای کیهانی مشاهده شده را باز تولید نمی‌کند.

مشخص شده است که ماده و میدان‌های مغناطیسی به صورت ناهمگن در کهکشان توزیع شده‌اند. ساختارهای کهکشانی، مثل ابرها و پوسته‌ها، با مقیاس‌های فضایی متفاوتی توزیع شده‌اند (لی و جوکیپی، ۱۹۷۶؛ کاپلان و پیکلنر، ۱۹۷۹؛ وینشتاین و همکاران، ۱۹۸۹؛ فالگرون و همکاران، ۱۹۹۱؛ چپل و اسکالو، ۲۰۰۱؛ علمگرین و همکاران، ۲۰۰۱). کهکشان دارای ساختاری چند مقیاسی است. بنابراین، ما انتشار پرتوهای کیهانی را در محیط بین‌ستاره‌ای با ساختار فراکتالی بررسی می‌کنیم، که یک محیط خودمتشابه با ساختاری ناهمگن است. خودمتشابهی کل کهکشان را پوشش نمی‌دهد، اما برای رنج وسیعی از مقیاس‌های فضایی معتبر است. انتشار در این محیط را انتشار غیرعادی می‌نامند، و توسط معادله انتشار متفاوتی نسبت به حالت همگن تعریف می‌شود. انتشار غیرعادی یک روند انتشاری است که رابطه غیرخطی با زمان دارد. لاگوتین و همکاران (۲۰۰۱ الف) بررسی انتشار ابرپخشی را پیشنهاد داده و یک رنج برای پارامتر پخش ( $\alpha$ ) مختص به چنین محیطی محاسبه کرده است، که  $0.6 < \alpha < 2$  یک پارامتر اساسی برای توصیف انتشار پرتوهای کیهانی در محیط بین‌ستاره‌ای فراکتالی است. مقدار آن وابسته به طیف بی‌نظمی‌های مغناطیسی محیط است. برای مدل پخش استاندارد، که منجر به توزیع گوسی چگالی ذرات می‌شود،  $\alpha = 2$  (انتشار عادی) است. از طرف دیگر،  $\alpha < 2$  مربوط به انتشار غیرعادی است. انتشار غیرعادی گهگاهی به ذرات اجازه می‌دهد که مسافت طولانی غیرمنتظره‌ای را بین برهم‌کنش‌ها سفر کنند. از طرف دیگر، مسافت‌های کوتاه بسیار بیشتری ممکن است بین برهم‌کنش‌ها وجود داشته باشد. لاگوتین و همکاران (۲۰۰۱ ب) و لاگوتین و اوچایکین (۲۰۰۱) نشان داده‌اند که زانو در طیف اولیه پرتوهای کیهانی به علت ساختار فراکتالی محیط بین‌ستاره‌ای است. به عبارت دیگر، زانو می‌تواند به علت مسافت‌های آزاد طولانی پرتوهای کیهانی بین ناهمگنی‌های میدان‌های مغناطیسی در محیط کهکشانی باشد و همچنین از این حقیقت باشد که ذرات می‌توانند در این میدان‌های مغناطیسی به مدت طولانی به دام بیفتند. پرتوهای کیهانی در فضا در تله‌های مغناطیسی حبس می‌شوند. کهکشان قادر به ایجاد تله‌ای خاص با ابعاد چندین هزار پارسک است که می‌تواند ذرات با انرژی‌های بالا و متوسط (با طول عمر  $10^7$  سال) را حبس کند (دورمن، ۲۰۰۶).

## ۲. انتشار پرتوهای کیهانی

دو مدل برای توصیف انتشار پرتوهای کیهانی در محیط میان‌ستاره‌ای وجود دارد. اگر روند انتشار توسط پراکندگی در ناهمگنی‌های میدان مغناطیسی با مقیاس کوچک تعیین شود و اگر بتواند به صورت یک مجموعه پواسون همگن در نظر گرفته شود، این حالت توسط مدل انتشار عادی توصیف می‌گردد (گینزبرگ و سیرواتسکی، ۱۹۶۴؛ برزینسکی و همکاران، ۱۹۹۰). معادله انتشار عادی به صورت:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D(E) \Delta N(\mathbf{r}, t, E) + S(\mathbf{r}, t, E) \quad (1)$$

است، که  $D(E)$  ضریب انتشار،  $N(\mathbf{r}, t, E)$  و  $S(\mathbf{r}, t, E)$  به ترتیب چگالی ذرات و چگالی منبع با انرژی  $E$  در مکان  $\mathbf{r}$  و زمان  $t$  است. در این حالت، پهنای بسته انتشار  $\Delta(t)$  توسط انحراف استاندارد توصیف می‌شود:

$$\Delta(t) = \langle r^2(t) \rangle^{1/2} \propto t^{1/2} \quad (2)$$

روند انتشار عادی توسط میانگین مجذور جابجایی تعریف می‌شود که با زمان، توسط یک انتشار دهنده گوسی، افزایش می‌یابد. لاگوتین و همکاران (۲۰۰۱ ب) وجود ساختارهای چند مقیاسی را در کهکشان فرض می‌کنند، شامل رشته‌ها، پوسته‌ها و ابرها که به طور وسیعی در محیط میان‌ستاره‌ای پخش شده‌اند. کشیدگی و جمع‌شدگی خطوط میدان مغناطیسی توسط حرکات آشفته محیطی که اندکی با میدان جفت شده است، باعث می‌شود میدان مغناطیسی هم، به ویژه در مقیاس‌های کوچک‌تر، به شدت تناوبی گردد. از آنجا که مناطق آشفته فضا را پر نمی‌کند، هندسه فراکتالی برای توصیف محیط میان‌ستاره‌ای و همچنین شدت میدان مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در چنین محیط کهکشانی فراکتالی، انتشار پرتوهای کیهانی نمی‌تواند توسط انتشار عادی توصیف شود. در عوض، مدل انتشار غیرعادی یا ابرپخشی پیشنهاد می‌شود. انتشار پرتوهای کیهانی در محیط میان‌ستاره‌ای فراکتالی بدون کاهش انرژی و فعل و انفعالات هسته‌ای توسط معادله‌ای برای پرتوهای کیهانی با انرژی E که از طریق منبع S(r, t, E) تولید شدند، توصیف می‌شود (لاگوتین و اوچایکین، ۲۰۰۱):

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -D(E, \alpha, \beta) D_{0+}^{1-\beta} (-\Delta)^{\frac{\alpha}{2}} N(\mathbf{r}, t, E) + S(\mathbf{r}, t, E) \quad (3)$$

که  $D(E, \alpha, \beta)$  ضریب انتشار غیرعادی است.  $\alpha$  و  $\beta$  توسط ساختار فراکتالی محیط و مکانیزم حبس تعیین می‌شوند،  $D_{0+}^{1-\beta}$  مشتق فراکشالی ریمان-لیویل را نشان می‌دهد، و  $(-\Delta)^{\alpha/2}$  لاپلاسین فراکشالی به نام عملگر ریس است. در اینجا، پهنای بسته انتشار به صورت (لاگوتین و اوچایکین، ۲۰۰۳):

$$\Delta(t) \propto t^{\gamma/2} \quad (4)$$

است.  $\gamma$  برابر با یک نیست (مقدار یک مربوط به انتشار عادی است).  $\gamma > 1$  (اما کمتر از دو) مربوط به ابرپخشی است. پخش غیرعادی یک انتشاردهنده غیر گوسی دارد، و واریانس آن سریع‌تر از حالت خطی در زمان رشد می‌کند.

## ۲-۱. میدان مغناطیسی کهکشانی

چند دهه قبل، میدان‌های مغناطیسی کیهانی عموماً غیر مهم تلقی می‌شدند. مشخص شده است که بیشتر ماده قابل مشاهده در کیهان در حالت پلازما قرار دارد. در حال حاضر، هیچ شکی وجود ندارد که میدان‌های مغناطیسی نقش مهمی را در کیهان ایفا می‌کنند. میدان مغناطیسی کهکشانی به دو مولفه تقسیم می‌شود: میدان‌های منظم که عموماً جهت بازوهای مارپیچی را دنبال می‌کنند، و میدان‌های تصادفی با مقیاس‌های کوچک‌تر (۱۰۰ پارسک یا کمتر). مولفه منظم میدان از طریق اندازه‌گیری‌های قطبش نوری، مشاهدات تابش چرخش فارادی از تب اخترهای کهکشانی، و اندازه‌گیری‌های قطبشی از تابش سینکروترون رادیویی به دست می‌آید. مشاهدات نشان می‌دهد خطوط میدان مقیاس بزرگ در جهت موازی با بازوهای مارپیچی هم‌جوار است. میدان تصادفی که ما در اینجا بهره بردیم، یک طیف آشفته کولموگرو دارد، به این علت که در بسیاری از موارد، طیف مشاهده شده نزدیک به طیف قانون توانی کولموگرو است که به صورت (گاگرو، ۲۰۱۲):

$$E(k) = C \epsilon^{2/3} k^{-5/3} \quad (5)$$

می‌باشد، که  $\epsilon$  نرخ جابجایی انرژی، و  $k$  معکوس مقیاس طول است. میدان منظم در دیسک کهکشانی به صورت (لی و کلی، ۱۹۹۳):

$$\vec{B}_{\text{reg}}(R_{\text{kpc}}, z_{\text{kpc}}) \simeq -2.15 \exp\left(-\frac{z_{\text{kpc}}^2}{z_0^2}\right) \sin(R_{\text{kpc}} - 3.2) \vec{e}_\phi \quad (6)$$

تعریف می‌شود، که  $z_0 = 0.175$  kpc و  $R$ ،  $\phi$  و  $z$  مختصات استوانه‌ای هستند.

## ۲-۲. شبیه‌سازی انتشار پرتوهای کیهانی در محیط کهکشانی

برای نگاهی نزدیک‌تر به موضوع انتشار در محیط کهکشانی، شبیه‌سازی‌های مربوط به انتشار در این محیط با یک مدل انتشار ساده بررسی شده است. در این مقاله، فرض شده است پرتوهای کیهانی از یک منبع در نزدیکی مرکز کهکشان، که در فاصله  $8/5 \text{ kpc}$  از ما قرار دارد، با زاویه تصادفی  $\theta$  و  $\Phi$  و با سرعت نور خارج می‌شوند. برنامه مسافت طی شده توسط پرتو کیهانی را محاسبه می‌کند و هر گام متناظر با  $0.1 \text{ pc}$  است. مولفه‌های سرعت از روابط:

$$v_x = c \sin\theta \cos\Phi, \quad v_y = c \sin\theta \sin\Phi, \quad v_z = c \cos\theta \quad (7)$$

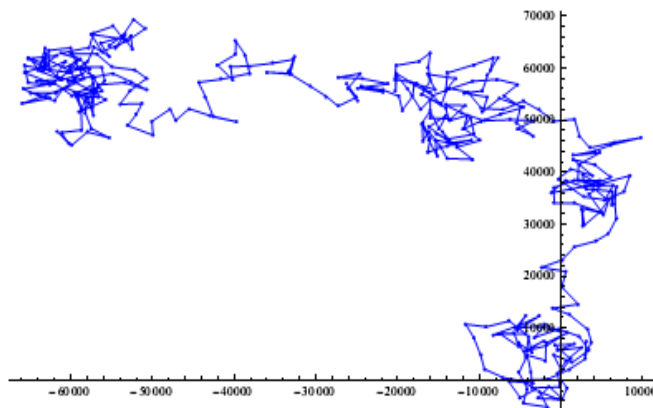
به دست می‌آید، که  $c$  سرعت نور است.

این برنامه قابلیت اجرا برای هر دو مدل انتشار عادی و غیرعادی را داراست و از تکنیک‌های توصیف شده در کلی و همکاران (۲۰۰۰) و کلی (۲۰۰۲) استفاده کرده است. پرتو کیهانی از میان میدان‌های مغناطیسی منظم و تصادفی در کهکشان عبور می‌کند و به سمت ما می‌آید. اگر انتشار عادی باشد، فرض می‌شود که میدان‌های مغناطیسی در کهکشان به صورت همگن پخش شده‌اند و پهنای بسته انتشار مطابق با معادله (۲) است، یا به عبارت دیگر میانگین مجذور جابجایی با زمان افزایش می‌یابد ( $\gamma=1$ ). اما اگر انتشار غیرعادی باشد فرض می‌شود میدان‌های مغناطیسی با مقیاس‌های فضایی متفاوتی در فضا پخش شده‌اند و ناهمگن هستند. در این حالت، پهنای بسته انتشار مطابق با معادله (۴) است، و در این برنامه  $\gamma=1.3$  انتخاب شده است. شدت میدان مغناطیسی منظم، که طبق معادله (۶) است، در بازوهای ماریچی حداکثر یک میکروگوس در نظر گرفته شده است. سپس، میدان نامنظم با طیف کولموگرو، که طبق معادله (۵) است، به آن اضافه می‌شود که شدت آن ۳ میکروگوس و بیشترین مقیاس طولی برای آن  $100 \text{ pc}$  در نظر گرفته شده است. ترکیب این دو میدان دارای مولفه‌های:

$$\begin{aligned} b_x &= B_{\text{reg}} \cos\Phi + B_{\text{reg}} b_{x\text{ran}} \\ b_y &= -B_{\text{reg}} \sin\Phi + B_{\text{reg}} b_{y\text{ran}} \\ b_z &= 0 + B_{\text{reg}} b_{z\text{ran}} \end{aligned} \quad (8)$$

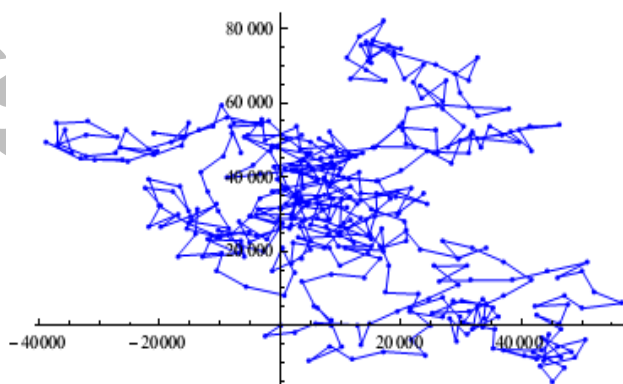
می‌باشد، که  $b_{x\text{ran}}$ ،  $b_{y\text{ran}}$  و  $b_{z\text{ran}}$  به ترتیب میدان مغناطیسی تصادفی در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  هستند که طبق طیف کولموگرو محاسبه شده‌اند. در این برنامه از مدل میدان مغناطیسی در لی و کلی (۱۹۹۵) بهره برده شده است.

ما شبیه‌سازی انتشار را برای هر دو مدل پخش عادی و غیرعادی برای پرتو کیهانی با انرژی  $10^{17} \text{ eV}$  را با این برنامه به دست آوردیم. این برنامه، مسافت‌های طی شده پرتوهای کیهانی را از مرکز کهکشان فراهم می‌آورد و سپس ما این گام‌ها را برای شبیه‌سازی مسیر حرکت پرتوهای کیهانی در دو بعد پس از طی کردن  $400$  گام در محیط میان‌ستاره‌ای مورد استفاده قرار دادیم تا تفاوت بین آنها را به تصویر بکشیم. نتایج در شکل ۱ و شکل ۲ آورده شده‌اند.



شکل ۱. مسیر حرکت یک پروتو کیهانی در دو بعد با انرژی  $10^{17}$  eV بعد از طی کردن  $400$  گام در محیط کهکشانی فراکتالی.

شکل ۱ انتشار غیرعادی و همچنین ناهمگنی های محیط را نمایش می دهد. این ناهمگنی ها ابرهای مغناطیسی هستند که پروتوهای کیهانی را به دام می اندازند. بیشتر فضای بین ابرهای مغناطیسی با میدان های ضعیف تری پر شده است که خطوط میدان ملایم آنها می تواند پروتوهای کیهانی را تا مسافت های طولانی همراهی کند. پروتوهای کیهانی در امتداد خطوط این میدان ها و در مسیرهای مارپیچی حرکت می کنند و گهگاهی وارد دام ابرها می شوند، محلی که می توانند برای یک مدت طولانی اقامت کنند. شما در این شکل می توانید اثر انتشار غیرعادی را ببینید که به ذرات اجازه می دهد مسافت های طولانی را مابین ناهمگنی ها سفر کنند. در انتشار غیرعادی، میانگین مجذور جابجایی یک ذره رابطه ای غیرخطی با زمان دارد و سریع تر از انتشار عادی رشد می کند. در شکل ۱، ناهمگنی ها تمایل به تشکیل گروه به صورت سلسله مراتب را دارند که از فرض ساختار فراکتالی می آید. واضح است که یک ذره مسافت طولانی غیرمنتظره ای را بین ناهمگنی ها سفر می کند و این دلیل ممکن است کافی باشد تا میدان مغناطیسی کهکشانی را به طرز غیرمنتظره ای به سرعت ترک کند. اثر این روند باعث کاهش زمان اقامت کل می شود.



شکل ۲. مسیر حرکت یک پروتو کیهانی در دو بعد با انرژی  $10^{17}$  eV بعد از طی کردن  $400$  گام در محیط کهکشانی همگن.

در شکل ۲، که انتشار عادی را نشان می دهد، پروتو کیهانی تقریبا به صورت همگن در محیط پخش می شود و به سادگی می توان متوجه شد که چگالی پروتو کیهانی در محیط همگن بیشتر از محیط ناهمگن است. در اینجا، میانگین مجذور جابجایی رابطه ای خطی با زمان

دارد. در انتشار عادی، زمان رسیدن به یک فاصله مشخص از منبع با مجذور فاصله افزایش می‌یابد. در نتیجه، شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که زمان اقامت کهکشانی و چگالی انرژی ذرات برای انتشار عادی بیشتر از انتشار غیرعادی است.

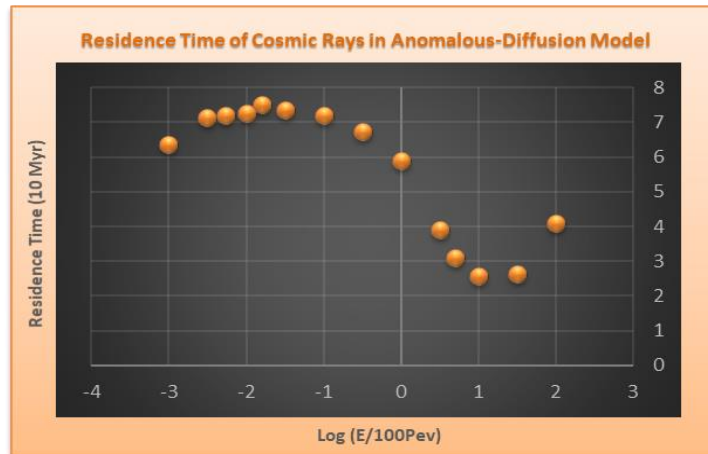
### ۲-۳. مدل زانو و قوزک

نظریه پردازان دو مدل برای خصوصیت قوزک در طیف انرژی پرتوهای کیهانی ارائه می‌دهند (گریسن، ۱۹۶۶؛ ناگانو و همکاران، ۱۹۹۲؛ الارد و همکاران، ۲۰۰۵؛ الارد و همکاران، ۲۰۰۷). اولین مدل، مدل انتقال کهکشانی-فراکهکشانی است که عنوان می‌کند قوزک به علت غلبه طیف فراکهکشانی بر طیف کهکشانی ایجاد شده است. مدل دوم، به نام مدل جفت تولید کاهشی است که بیان می‌کند قوزک به علت انتشار پروتون در مسیرهای طولانی و در برهمکنش با امواج کیهانی پس زمینه است.

این حقیقت که طیف پرتوهای کیهانی در منبع و بر روی زمین متفاوت هستند، باعث ایجاد نظریه‌های مختلفی درباره منشأ پرتوهای کیهانی و طبیعت زانو می‌شود. مدل‌های زانو (پتوسکین و همکاران، ۱۹۹۳؛ مارین و همکاران، ۲۰۰۱؛ بیکو و تاپتین، ۲۰۰۱؛ لاگوتین و اوچایکین، ۲۰۰۱؛ لاگوتین و همکاران، ۲۰۰۱؛ ب؛ لاگوتین و اوچایکین، ۲۰۰۳؛ اوچیو و کاکیموتو، ۲۰۰۳؛ رولت، ۲۰۰۴؛ پتوسکین و زیراکشویلی، ۲۰۰۵؛ پتوسکین، ۲۰۰۶) می‌توانند به دو دسته عمده تقسیم شوند: مدل‌های منبع که با تغییر منبع یا تغییر در مکانیزم شتابدهی تعریف می‌شوند، و مدل‌های انتشار که با تغییر در نحوه انتشار پرتوهای کیهانی بین منبع و مشاهده‌گر تعریف می‌شوند. این گونه به نظر می‌رسد که ابرنواخترها و بقایای ابرنواختری منابع بسیار محتمل تولید پرتوهای کیهانی تا انرژی زیر زانو هستند. در برخی مفاهیم، زانو مربوط به ماکزیمم انرژی به دست آمده در طول شتابدهی در امواج شوک بقایای ابرنواختری است. روند شتابدهی زمانی حاصل می‌شود که انتشار ذرات پر انرژی به آنها اجازه می‌دهد که دفعات بسیاری از ابتدای شوک عبور کنند و با هر بار عبور پی در پی از ابتدای شوک، انرژی ذرات افزایش می‌یابد. ارلیکین و ولفندال (۲۰۰۱) بیان می‌کند که زانو توسط یک ابرنواختر تنها و نزدیک که اخیراً منفجر شده، ایجاد شده است. احتمال بعدی شتابدهی در تب اخترها (پالسار) است. پتوسکین و همکاران (۱۹۹۳) بیان می‌کند که انباشتگی ذرات در میدان مغناطیسی منظم کهکشان ممکن است مسئول ایجاد زانو باشد. به عنوان آخرین احتمال فرض می‌شود که پروسه‌های جدیدی بین ذرات اولیه در اتمسفر ایجاد می‌شود که ممکن است انرژی را به کانال‌های غیر قابل مشاهده‌ای منتقل کند، و در نتیجه باعث ایجاد زانو در المان‌های مشاهده شده دوش هوایی شود. دومین دسته از مدل‌ها انتشار پرتوهای کیهانی را در محیط میان‌ستاره‌ای توصیف می‌کند. لاگوتین و همکاران (۲۰۰۱) بیان می‌کند که زانو مربوط به انتشار غیرعادی پرتوهای کیهانی در میدان‌های مغناطیسی کهکشان است. مدل‌های متنوعی برای توصیف زانو و قوزک وجود دارد. بیشترین مدل‌های بحث شده، قاعده‌های کلی راجع به شتابدهی، انتشار و برهمکنش پرتوهای کیهانی را مطرح می‌کنند. در این مقاله، ما به مدل انتشار ذرات در محیط میان‌ستاره‌ای کهکشانی پرداخته‌ایم.

### ۳. محاسبه زمان اقامت در انتشار غیرعادی

زمان اقامت تفاوت بین زمان انتشار پرتوهای کیهانی در میدان مغناطیسی و زمان انتشار نور است. ما زمان اقامت پرتوهای کیهانی با رنج انرژی  $10^{19}$ – $10^{14}$  eV را با برنامه‌ای که در بخش ۲-۲ توضیح داده شده، محاسبه کردیم، با این فرض که انتشار پرتوهای کیهانی در کهکشان توسط انتشار غیرعادی در نظر گرفته بشود. شکل ۳ نتایج محاسبات زمان اقامت را نشان می‌دهد. فرض شده است که منبع در نزدیکی مرکز کهکشان قرار دارد و پرتوهای کیهانی از آنجا از میان یک مدل میدان مغناطیسی کهکشانی، که هم دارای مولفه منظم و هم دارای مولفه تصادفی است، به سمت ما می‌آیند (لی و کلی، ۱۹۹۵).



شکل ۳. زمان اقامت پرتوهای کیهانی با انرژی‌های مختلف در محیط کهکشانی در انتشار غیرعادی.

شکل ۳ نشان می‌دهد که زمان اقامت کهکشانی با انرژی تا  $1/8 -$  (معادل با  $1/5 \times 10^{15} \text{ eV}$ ) افزایش اندکی می‌یابد، سپس تا مقدار ۱ (معادل با  $10^{18} \text{ eV}$ ) کاهش می‌یابد، و بعد از آن دوباره افزایش می‌یابد. بنابراین تغییر در الگوی نمودار در این انرژی‌ها دیده می‌شود، که به ترتیب زانو و قوزک طیف نامیده می‌شوند. بنابراین این خصوصیات می‌تواند به علت انتشار غیرعادی پرتوهای کیهانی در محیط کهکشانی باشد. زمان اقامت پرتوهای کیهانی با افزایش انرژی کاهش می‌یابد، زیرا برهمکنش پرتوهای کیهانی با میدان‌های مغناطیسی محیط میان‌ستاره‌ای کاهش می‌یابد و این موضوع باعث کاهش زمان اقامت می‌شود. در شکل ۳ می‌توان دید که زمان اقامت از زانو تا قوزک کاهش یافته، و برای مابقی انرژی‌ها در نمودار افزایش می‌یابد. ضریب انتشار برای پرتوهای کیهانی بر انرژی متناسب با  $E^2$  است (کاجلریس، ۲۰۰۸). بنابراین هنگامی که یک پرتو کیهانی بسیار پر انرژی در مسیر حرکت خود به یک ماده برخورد می‌کند، به شدت منحرف می‌شود و برگشت به مسیر قبلی آن زمان زیادی می‌گیرد. بنابراین زمان اقامت پرتوهای کیهانی بسیار پر انرژی افزایش می‌یابد. در انرژی‌های پایین، ضریب انتشار تقریباً ثابت است (کاجلریس، ۲۰۰۸). برای انرژی‌های پایین‌تر از زانو، زمان اقامت اندکی افزایش می‌یابد.

#### ۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این مقاله، انتشار پرتوهای کیهانی در محیط کهکشانی را مورد آنالیز و شبیه‌سازی قرار دادیم. ما به طور خاص بر روی انتشار غیرعادی پرتوهای کیهانی تمرکز کردیم. محاسبات نشان می‌دهد که اولین تغییر الگو در شکل ۳ در محدوده انرژی  $1/5 \times 10^{15} \text{ eV}$  رخ داده، که نزدیکی خوبی با انرژی  $3 \times 10^{15} \text{ eV}$  (زانو) دارد. ما انتظار داریم که نتایج به دست آمده در اینجا برای مبحث زانو در طیف انرژی پرتوهای کیهانی مفید خواهد بود. ما فکر می‌کنیم که دومین تغییر الگو در شکل ۳ (یا همان قوزک) نیز می‌تواند نتیجه انتشار غیرعادی پرتوهای کیهانی در محیط کهکشانی فراکتالی باشد. انتشار عادی پرتوهای کیهانی در محیط کهکشانی همچنین زمان اقامت طولانی‌تر و چگالی انرژی بیشتری نسبت به انتشار غیرعادی ذرات ارائه می‌دهد. بنابراین فرض بهتر آن است که بگوییم ساختار مغناطیسی در کهشان دارای خصوصیات فراکتالی است و به طور ناهمگن در فضا پخش شده‌اند.

منابع:



- Abu-Zayyad, T., Belov, K., Bird, D. J., Boyer, J., Cao, Z., Catanese, M., ... & Zhang, X. Z. (2001). Measurement of the cosmic-ray energy spectrum and composition from 1017 to 1018.3 eV using a hybrid technique. *The Astrophysical Journal*, 557(2), 686.
- Allard, D., Parizot, E., Olinto, A. V., Khan, E., & Goriely, S. (2005). UHE nuclei propagation and the interpretation of the ankle in the cosmic-ray spectrum. *Astronomy & Astrophysics*, 443(3), L29-L32.
- Allard, D., Parizot, E., & Olinto, A. V. (2007). On the transition from galactic to extragalactic cosmic-rays: Spectral and composition features from two opposite scenarios. *Astroparticle Physics*, 27(1), 61-75.
- Berezinsky, V. S., Ginzburg, V. L., Bulanov, S. V., & Dogiel, V. (1990). PTUSKIN, VS. *Astrophysics of cosmic rays*. North-Holland, Amsterdam, Netherlands.
- Bykov, A. M., & Toptygin, I. N. (2001). A model of particle acceleration to high energies by multiple supernova explosions in OB associations. *Astronomy Letters*, 27, 625-633.
- Castellina, A. (2001). Cosmic ray composition and energy spectrum above 1 TeV: direct and EAS measurements. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 97(1-3), 35-47.
- Chappell, D., & Scalo, J. (2001). Multifractal scaling, geometrical diversity, and hierarchical structure in the cool interstellar medium. *The Astrophysical Journal*, 551(2), 712.
- Clay, R. W., Dawson, B. R., Bowen, J., & Debes, M. (2000). Cosmic rays from the galactic center. *Astroparticle Physics*, 12(4), 249-254.
- Clay, R. W. (2000). Propagation of Cosmic Rays from the Vicinity of the Galactic Centre. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 17(3), 212-214.
- Clay, R. W. (2002). The source energy spectrum of cosmic rays. *Publications of the Astronomical Society of Australia*, 19(2), 228-232.
- Dorman, L. (2006). *Cosmic ray interactions, propagation, and acceleration in space plasmas* (Vol. 339). Springer Science & Business Media.
- Elmegreen, B. G., Kim, S., & Staveley-Smith, L. (2001). A fractal analysis of the HI emission from the Large Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal*, 548(2), 749.
- Erlykin, A. D. (1995). Around and above the knee. *Nuclear Physics B Proceedings Supplements*, 39(1), 215-227.
- Erlykin, A. D., & Wolfendale, A. W. (2001). Structure in the cosmic ray spectrum: an update. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 27(5), 1005.
- Falgarone, E., Phillips, T. G., & Walker, C. K. (1991). The edges of molecular clouds-Fractal boundaries and density structure. *Astrophysical Journal, Part 1 (ISSN 0004-637X)*, vol. 378, Sept. 1, 1991, p. 186-201., 378, 186-201.
- Gaggero, D. (2012). Cosmic Ray Diffusion in the Galaxy. *Cosmic Ray Diffusion in the Galaxy and Diffuse Gamma Emission*, 7-28.
- Ginzburg, V. L., & Syrovatskii, S. I. (1964). The secondary electron component of cosmic rays and the spectrum of general galactic radio emission. *Soviet Astronomy*, Vol. 8, p. 342, 8, 342.
- Greisen, K. (1966). End to the cosmic-ray spectrum?. *Physical Review Letters*, 16(17), 748.
- Kachelriess, M. (2008). Lecture notes on high energy cosmic rays. *arXiv preprint arXiv:0801.4376*.
- Kaplan, S., & Pikelner, S. (1979). The physics of the interstellar medium (Russian book). *Moscow, Izdatel'stvo Nauka*, 1979. 592.
- Lagutin, A. A., Makarov, V. V., & Tyumentsev, A. G. (2001 a). Anomalous diffusion of the cosmic rays: steady-state solution. *arXiv preprint astro-ph/0107253*.
- Lagutin, A. A., Nikulin, Y. A., & Uchaikin, V. V. (2001b). The "knee" in the primary cosmic ray spectrum as consequence of the anomalous diffusion of the particles in the fractal interstellar medium. *Nuclear Physics B-Proceedings Supplements*, 97(1-3), 267-270.
- Lagutin, A. A., & Uchaikin, V. V. (2001). Fractional diffusion of cosmic rays. *arXiv preprint astro-ph/0107230*.
- Lagutin, A. A., & Uchaikin, V. V. (2003). Anomalous diffusion equation: Application to cosmic ray transport. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 201(1), 212-216.
- Lee, A. A., & Clay, R. W. (1993). Effects of Galactic Magnetic Field Turbulence on EHE Cosmic Ray Propagation. In *23rd International Cosmic Ray Conference (ICRC23), Volume 2* (Vol. 2, p. 77).
- Lee, A. A., & Clay, R. W. (1995). The anisotropy of EHE cosmic rays. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 21(12), 1743.
- Lee, L. C., & Jokipii, J. R. (1976). The irregularity spectrum in interstellar space. *Astrophysical Journal*, vol. 206, June 15, 1976, pt. 1, p. 735-743., 206, 735-743.
- Maurin, D., Donato, F., Taillet, R., & Salati, P. (2001). Cosmic rays below  $z=30$  in a diffusion model: new constraints on propagation parameters. *The Astrophysical Journal*, 555(2), 585.

- Nagano, M., Teshima, M., Matsubara, Y., Dai, H. Y., Hara, T., Hayashida, N., ... & Yoshida, S. (1992). Energy spectrum of primary cosmic rays above 1017.0 eV determined from extensive air shower experiments at Akeno. *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics*, 18(2), 423.
- Ogio, S., & Kakimoto, F. (2003, July). Advective diffusion propagation model for galactic cosmic rays above 1012 eV. In *International Cosmic Ray Conference* (Vol. 1, p. 315).
- Ptuskin, V. S., Rogovaya, S. I., Zirakashvili, V. N., Chuvilgin, L. G., Khristiansen, G. B., Klepach, E. G., & Kulikov, G. V. (1993). Diffusion and drift of very high energy cosmic rays in galactic magnetic fields. *Astronomy and Astrophysics (ISSN 0004-6361)*, vol. 268, no. 2, p. 726-735., 268, 726-735.
- Ptuskin, V. S., & Zirakashvili, V. N. (2005). On the spectrum of high-energy cosmic rays produced by supernova remnants in the presence of strong cosmic-ray streaming instability and wave dissipation. *Astronomy & Astrophysics*, 429(3), 755-765.
- Ptuskin, V. (2006, October). Cosmic ray transport in the Galaxy. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 47, No. 1). IOP Publishing.
- Roulet, E. (2004). Astroparticle theory: Some new insights into high energy cosmic rays. *International Journal of Modern Physics A*, 19(07), 1133-1141.
- Vainshtein, S. I., Bykov, A. M., & Toptygin, I. N. (1989). Turbulence, stream layers and shock wave in cosmic plasm. *M.: Nauka*.

موسسه بین‌المللی دانشیاران  
روید استادی نشسته