

## مطالعه امکان اندازه گیری میدان مغناطیسی ستاره چشمه در عبور از خط سوزان

احمد مهرابی<sup>۱</sup>، حبیب خسروشاهی<sup>۲</sup> و هادی رحمانی<sup>۳</sup>

۱. دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران

۳. دانشگاه آیکس مارسلی، مارسلی، فرانسه

پست الکترونیکی: Mehrabi@basu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۲۸؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۵/۱۲/۱۲)

### چکیده

در یک رویداد همگرایی گرانشی، هنگام عبور چشمه از خط سوزان، نور لکه روی ستاره می‌تواند چندین مرتبه بیشتر نسبت به خود ستاره تقویت شود. این اختلاف تقویت نور زمان مناسبی برای آشکار سازی اندازه میدان مغناطیسی روی ستاره فراهم می‌آورد. در این مقاله به بررسی امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی به وسیله اثر زیمنان<sup>۱</sup> در زمان عبور چشمه از خط سوزان خواهیم پرداخت. با استفاده از آنالیز فوریه می‌توان سایر عوامل ایجاد جابه‌جایی در طیف ستاره را شناسایی و جابه‌جایی در اثر زیمنان را مجزا کرد. در مرحله بعد با استفاده از فرمول‌بندی ریزهمگرایی گرانشی میزان اختلاف تقویت نور لکه و ستاره را محاسبه کرده و با استفاده از دو استراتژی رصدی و روش مونت کارلو، امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی را مطالعه می‌کنیم. دقت طیف‌سنجی و میزان سیگنال به نوفه در هر استراتژی مشخص کننده میدان‌های مغناطیسی قابل مشاهده است.

واژه‌های کلیدی: ریزهمگرایی گرانشی، میدان مغناطیسی ستاره‌ای، طیف‌سنجی

### ۱. مقدمه

هم، این اثر باعث افزایش نور چشمه شده که قابل اندازه‌گیری است. برای یک عدسی تکی، تقویت نور یک چشمه نقطه‌ای و گسترده به صورت تحلیلی قابل محاسبه است [۱]. برخلاف عدسی تکی، در عدسی‌های دوتایی و چندتایی، تقویت نور را نمی‌توان به صورت تحلیلی به دست آورد و از روش‌های دیگر برای این منظور استفاده می‌شود. از مهم‌ترین روش‌ها می‌توان به الگوریتم پرتاب پرتو برعکس [۲] و شبکه بهینه [۳] اشاره کرد. همگرایی گرانشی نه تنها یک ابزار منحصر به فرد برای

هنگامی که یک جرم فشرده (عدسی گرانشی) به اندازه کافی در امتداد یک چشمه نور هم خط می‌شود، در اثر همگرایی گرانشی و انحراف نور دو تصویر مجزا از چشمه ایجاد می‌شود. در ابعاد کیهکشانی فاصله جدایی این تصاویر از مرتبه ده هزارم ثانیه قوسی است و در نتیجه با تلسکوپ‌های زمینی قابل آشکار سازی نیستند. با وجود عدم امکان مشاهده دو تصویر جدا از

۱. Zeeman

دید بستگی دارد. در واقع در اثر عبور ستاره چشمه شامل یک لکه از روی خط سوزان، میزان نسبت مساحت لکه به چشمه با زمان افزایش می‌یابد و این افزایش موجب تقویت سیگنال میدان مغناطیسی خواهد شد. به دلیل ظهور طیف‌سنج‌های قوی مانند یوس<sup>۲</sup>، هارپس<sup>۳</sup> و هایرس<sup>۴</sup> آشکار سازی میدان‌های مغناطیسی ستاره‌ای وارد مرحله جدیدی شده است. در واقع اندازه‌گیری میدان مغناطیسی به روش طیف‌سنجی در هنگام گذر از خط سوزان، یک روش بسیار مفید برای مطالعه میدان‌های مغناطیسی ستاره‌های دور دست فراهم می‌کند.

ساختار این مقاله به این صورت است. در بخش ۲ به ریز همگرایی گرانشی می‌پردازیم و معادلات مربوطه را معرفی خواهیم کرد. در بخش ۳ نشان خواهیم داد که یک خط طیفی در حضور میدان مغناطیسی به چه صورت تغییر می‌کند و چطور می‌توان با استفاده از تحلیل فوریه مقدار میدان را به دست آورد. در بخش ۴ با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی را بررسی می‌کنیم و در پایان در بخش ۵ نتیجه‌گیری و بحث را خواهیم آورد.

## ۲. همگرایی گرانشی و تقویت نور هنگام عبور از

### خط سوزان

میدان گرانشی عدسی نور یک چشمه را منحرف می‌کند. این انحراف نور بسته به توزیع جرم عدسی می‌تواند دو یا چند تصویر ایجاد کند و از آن جا که همگرایی گرانشی تابیدگی سطحی چشمه را تغییر نمی‌دهد، میزان افزایش نور چشمه برابر با میزان افزایش مساحت تصاویر ایجاد شده است. زاویه انحراف در صفحه عدسی با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۱].

$$\alpha(X) = \frac{1}{\pi} \int \kappa(X') \frac{X - X'}{|X - X'|^2} d^2x'. \quad (1)$$

در اینجا  $\kappa(X)$  چگالی سطحی جرم در صفحه عدسی است و تمام فواصل به یک مقیاس طول به نام شعاع انیشتن به هنجار

مطالعه عدسی‌ها، بلکه یک ابزار مفید برای مطالعه ستاره چشمه فراهم می‌آورد [۴ و ۵]. برای عدسی‌هایی دوتایی یا بیشتر، منحنی‌های بسته‌ای در صفحه عدسی وجود دارند که وقتی یک چشمه نقطه‌ای روی آنها قرار می‌گیرد، تقویت نور آن بی‌نهایت می‌شود. این منحنی‌ها، منحنی‌های سوختیک نام دارند و مکان هندسی تصاویر ایجاد شده وقتی چشمه روی منحنی سوختیک است، منحنی‌های بحرانی را تشکیل می‌دهند. هنگام عبور یک چشمه از خط سوزان، نور آن نسبت به مکان‌های دیگر در صفحه چشمه بیشتر تقویت شده و در صورت وجود لکه روی چشمه، نور این لکه می‌تواند تا چند صد مرتبه بیشتر تقویت شود. در این مقاله از این ایده استفاده شده و قصد داریم امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی هنگام عبور چشمه از خط سوزان را بررسی کنیم.

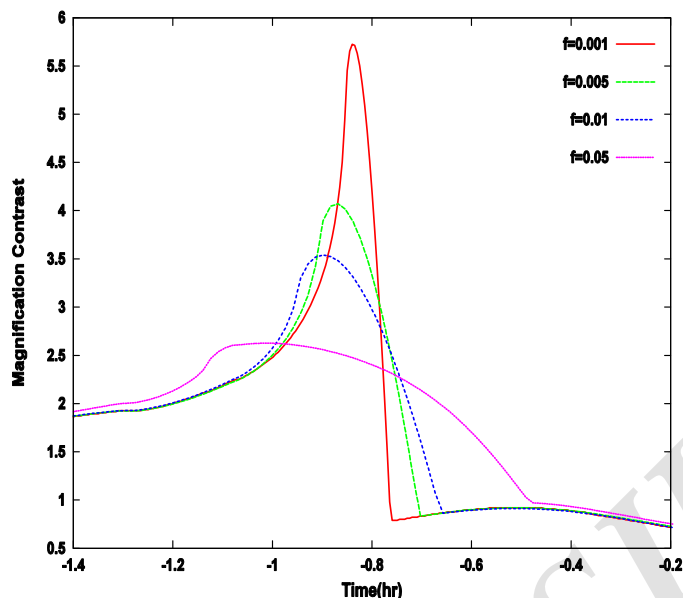
شواهد وجود میدان مغناطیسی روی خورشید در سال ۱۹۰۸ توسط هال به دست آمد [۶]. در این راستا هال با استفاده از اثر زیمان، میدان‌های مغناطیسی به بزرگی ۲۶۰۰ - ۲۹۰۰ گوس را روی لکه‌های خورشیدی اندازه‌گیری کرد [۶]. آشکار سازی میدان‌های مغناطیسی روی ستاره‌های دور دست بسیار مشکل است. در واقع پدیده‌های دیگری روی سطح ستاره وجود دارند که میزان جابه‌جایی خطوط طیفی حاصل از آنها از مرتبه جابه‌جایی زیمان است و از این رو باید این اثرات را از هم تفکیک نمود. از جمله این اثرات می‌توان به وجود نقاط سرد و داغ روی سطح ستاره اشاره نمود که باعث جابه‌جایی خطوط می‌شوند [۷ و ۸]. به رغم این مشکلات میدان مغناطیسی متوسط روی سطح یک ستاره برای اولین بار در سال ۱۹۷۱ اندازه‌گیری شد [۹]. در سال ۱۹۸۰ رابینسون<sup>۱</sup> روش مفیدی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ستاره‌ها در اثر شکافتگی زیمان با استفاده از تحلیل فوریه ابداع کرد [۱۰]. در این روش از تبدیل فوریه دو خط طیفی استفاده می‌شود که یک خط حساس به میدان مغناطیسی و دیگری غیرحساس است. میزان سیگنال میدان مغناطیسی به نسبت مساحت لکه به ستاره، بزرگی میدان مغناطیسی و زاویه بین میدان مغناطیسی و راستای

۲. UVES

۳. HARPS

۴. HIRES

۱. Robinson



شکل ۱. (رنگی در نسخه الکترونیکی) افزایش تقویت نور یک لکه در مقایسه با خود چشمه برای چند لکه با اندازه‌های متفاوت.

مشخص می‌کنند و با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس ژاکوبی حاصل می‌شوند.

تقویت نور برای یک چشمه گسترده با انتگرال‌گیری روی سطح چشمه به دست می‌آید و همان‌طور که در ابتدا ذکر کردیم برای عدسی‌های دوتایی و بیشتر، این تقویت نور را نمی‌توان با استفاده از توابع تحلیلی بیان کرد. از این‌رو برای محاسبه تقویت نور در این کار از روش شبکه بهینه استفاده شده است [۳]. حال فرض می‌کنیم روی چشمه یک لکه دایره‌ای قرار دارد که مساحت آن  $A_S$  است. نسبت مساحت لکه به مساحت کل چشمه را با کمیت  $f$  نشان می‌دهیم. با توجه به این نکته که هر چقدر چشمه کوچک‌تر باشد، تقویت نور آن در گذر از خط سوزان، بزرگ‌تر خواهد بود، انتظار داریم هنگام عبور یک چشمه شامل لکه از خط سوزان، تقویت نور لکه نسبت به کل چشمه بزرگ‌تر باشد. در واقع در این کار قصد داریم امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی لکه در اثر این بزرگ شدن را بررسی کنیم. در شکل ۱ نسبت تقویت نور لکه به چشمه برای چند لکه با اندازه‌های مختلف رسم شده است. در این شکل منظور از تباین تقویت نور (محور عمودی) نسبت تقویت نور لکه به تقویت نور کل چشمه است که نشان دهنده

شده است. شعاع انیشتن از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$R_E = r_{\odot} \sqrt{\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) \left(\frac{D_S}{\text{Kpc}}\right) \left(\frac{p(1-p)}{0.25}\right)} AU. \quad (2)$$

در این رابطه،  $M$ ،  $D_S$  و  $p$  به ترتیب جرم عدسی، فاصله چشمه و نسبت فاصله عدسی به چشمه را نشان می‌دهند. معادله عدسی توسط رابطه زیر داده می‌شود و با استفاده از آن می‌توان محل تصاویر را مشخص کرد.

$$Y = X - \alpha(X). \quad (3)$$

در اینجا  $Y$  مکان چشمه را نشان می‌دهد و حروف بزرگ انگلیسی برای بردارهای دو بعدی به کار برده شده است. در همگرایی گرانشی اثر انحراف نور را می‌توان به صورت نگاشت از صفحه چشمه به صفحه عدسی در نظر گرفت. در این صورت نسبت مساحت تصویر به چشمه با استفاده از دترمینان ژاکوبی به دست می‌آید.

$$\mu_i = \det\left(\frac{\partial Y}{\partial X}\right)^{-1}(X_i). \quad (4)$$

حال برای به دست آوردن تقویت نور کل، باید روی تمام تصاویر جمع بزنیم. همان‌طور که در بالا ذکر شد، در صفحه چشمه، می‌توان نقاطی را یافت که تقویت نور یک چشمه نقطه‌ای در آنها بی‌نهایت است. این نقاط خطوط سوزان را

معادله (۷) طول موج‌های بزرگ‌تر جابه‌جایی طیفی بیشتری دارند. در نتیجه استفاده از خطوط طیفی در محدوده فرسرخ، از محدوده اپتیکی مناسب‌تر است. برای مثال خطوط طیفی حساس FeI در ۱،۵۶ میکرومتر و TiI در ۲،۲۲ میکرومتر دو خط طیفی مناسب برای مشاهده میدان مغناطیسی هستند.

همان‌طور که در بالا ذکر شد علاوه بر جابه‌جایی زمین، اثرات دیگری وجود دارند که می‌توانند در یک خط طیفی جابه‌جایی ایجاد کنند. از جمله مهم‌ترین این اثرات می‌توان به جابه‌جایی در اثر تغییر سرعت، افت و خیزهای کوچک و بزرگ روی سطح ستاره و پهن‌شدگی در اثر عبور نور از تلسکوپ اشاره کرد. برای در نظر گرفتن تمام این اثرات باید پیچش این اثرات با تابع خط طیفی را محاسبه نماییم.

$$P(\lambda) = R(\lambda) * V(\lambda) * M(\lambda) * I(\lambda). \quad (۸)$$

در فضای فوریه این رابطه به صورت زیر در می‌آید.

$$p(k) = r(k) v(k) m(k) i(k). \quad (۹)$$

در اینجا حروف کوچک نشان‌دهنده کمیت در فضای فوریه است و  $M$  نماینده افت و خیزهای سطحی ستاره است. در رابطه (۸)  $R(\lambda)$  بیانگر تابع طیفی کل چشمه و لکه است که با استفاده از رابطه زیر داده می‌شود.

$$R(\lambda) = fR_m(\lambda) + (1-f)R_s(\lambda). \quad (۱۰)$$

تبدیل فوریه این رابطه به صورت

$$r(k) = r_s(k) [f \alpha (\cos(\gamma \Delta \lambda k) - 1) + 1], \quad (۱۱)$$

در می‌آید. در این کار از روش رابینسون [۱۰] برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی استفاده می‌کنیم. در این روش با استفاده از تقسیم دو خط طیفی داریم

$$\frac{p(g_1, k)}{p(g_2, k)} = \frac{r(g_1, k)}{r(g_2, k)}, \quad (۱۲)$$

در نتیجه تمام اثرات مخرب پهن‌شدگی به جز اثر زمین حذف می‌شوند. برای آشکار سازی میدان مغناطیسی می‌توان از دو خط طیفی یکی حساس به میدان مغناطیسی (لاندا فاکتور بزرگ) و یکی غیر حساس به میدان مغناطیسی (لاندا فاکتور کوچک) استفاده نمود. در بخش بعد با استفاده از روابط این قسمت به مطالعه امکان اندازه‌گیری میدان مغناطیسی چشمه

افزایش نسبت مساحت‌ها است. همان‌طور که از این شکل مشخص است، لکه‌ای که یک هزارم سطح چشمه را پوشش می‌دهد می‌تواند تا ۶ برابر چشمه تقویت نور داشته باشد.

در این کار ما از خطوط سوزان یک عدسی دوتایی استفاده می‌کنیم. یک عدسی دوتایی توسط دو پارامتر نسبت جرم دو عدسی و فاصله آنها در واحد شعاع انیشتن مشخص می‌شود. در شکل (۱) نسبت جرم را  $0.01$  و فاصله را یک در نظر گرفته‌ایم. در ادامه به بررسی اثر میدان مغناطیسی روی یک خط طیفی و نحوه مجزا کردن آن از بقیه اثرات مشابه می‌پردازیم.

### ۳. جابه‌جایی خطوط طیفی در اثر میدان مغناطیسی

میدان‌های مغناطیسی بزرگی روی لکه‌های ستاره‌ها وجود دارند. این میدان‌های مغناطیسی یک خط طیفی حساس به میدان مغناطیسی را به چند خط تقسیم می‌کنند (اثر زمین). میزان جابه‌جایی یک خط طیفی به حاصل ضرب میدان مغناطیسی و فاکتور لاندا ( $g$ ) بستگی دارد [۱۲]. منظور از یک خط طیفی حساس، داشتن  $g$  بزرگ است. این ثابت به تراز اولیه و تراز نهایی یک خط طیفی بستگی دارد و مقدار آن برای خطوط طیفی متفاوت مشخص است. یک خط طیفی در حضور میدان مغناطیسی به شکل زیر تغییر می‌کند.

$$F_m(\lambda) = F_s(\lambda) * \left[ \frac{a}{\gamma} \delta(\lambda - \Delta\lambda) + \frac{a}{\gamma} \delta(\lambda + \Delta\lambda) + b \delta(\lambda) \right]. \quad (۵)$$

در اینجا  $F(\lambda)$  پروفایل یک خط طیفی است و  $a$  و  $b$  دو ثابت هستند که به جهت میدان مغناطیسی و راستای دید بستگی دارند و توسط روابط زیر مشخص می‌شوند [۱۳].

$$a = 0.5(1 + \cos^2 \gamma), b = 0.5 \sin^2 \gamma. \quad (۶)$$

زاویه  $\gamma$  در این رابطه، زاویه بین میدان مغناطیسی در سطح ستاره و راستای دید است. علامت ستاره بیانگر پیچش و  $\delta(x)$  تابع دلتای دیراک است. میزان جابه‌جایی یک خط طیفی با استفاده از رابطه زیر داده می‌شود.

$$\Delta\lambda = 35.44 \left( \frac{g}{1/2} \right) \left( \frac{\lambda_0}{0.18 \mu m} \right)^2 \left( \frac{B}{1 KG} \right) mA. \quad (۷)$$

در این رابطه میدان مغناطیسی به هزار گوس به‌هم‌جار شده است و میزان جابه‌جایی بر حسب میلی‌آنگستروم است. بر اساس

با توجه به رابطه (۱۱) و (۱۲) برای دو خط طیفی حساس و غیرحساس داریم.

$$\frac{r(g_1, k)}{r(g_2, k)} = \frac{r_0^{sen}(k) [fa(\cos(2\pi\Delta\lambda^{sen} k) - 1) + 1]}{r_0^{ins}(k) [fa(\cos(2\pi\Delta\lambda^{ins} k) - 1) + 1]} \quad (13)$$

در این رابطه صورت کسر خط طیفی حساس و مخرج کسر خط طیفی غیرحساس را نشان می‌دهد. کمیت های  $r_0^{sen}(k)$  و  $r_0^{ins}(k)$  توابع طیفی حساس و غیرحساس را نشان می‌دهند و در عمل با استفاده از حل معادلات تابشی ستاره قابل محاسبه هستند [۱۴]. در این صورت سیگنال میدان مغناطیسی از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$S(B) = \frac{fa(\cos(2\pi\Delta\lambda^{sen} k) - 1) + 1}{fa(\cos(2\pi\Delta\lambda^{ins} k) - 1) + 1} \quad (14)$$

برای محاسبه جابه‌جایی طیف در خط حساس و غیرحساس به ترتیب از  $g_1 = 2/5$  و  $g_2 = 1$  در طول موج  $\lambda = 0.8 \mu m$  استفاده شده است. برای محاسبه کمیت  $a$  در این رابطه، از متوسط زاویه بین میدان مغناطیسی و راستای دید  $\gamma = 34^\circ$  که توسط [۱۵] به دست آمده، استفاده شده است. هنگامی که میدان مغناطیسی صفر است، سیگنال میدان مغناطیسی (رابطه (۱۴)) یک است و هر انحرافی از این مقدار نشان دهنده وجود میدان مغناطیسی است.

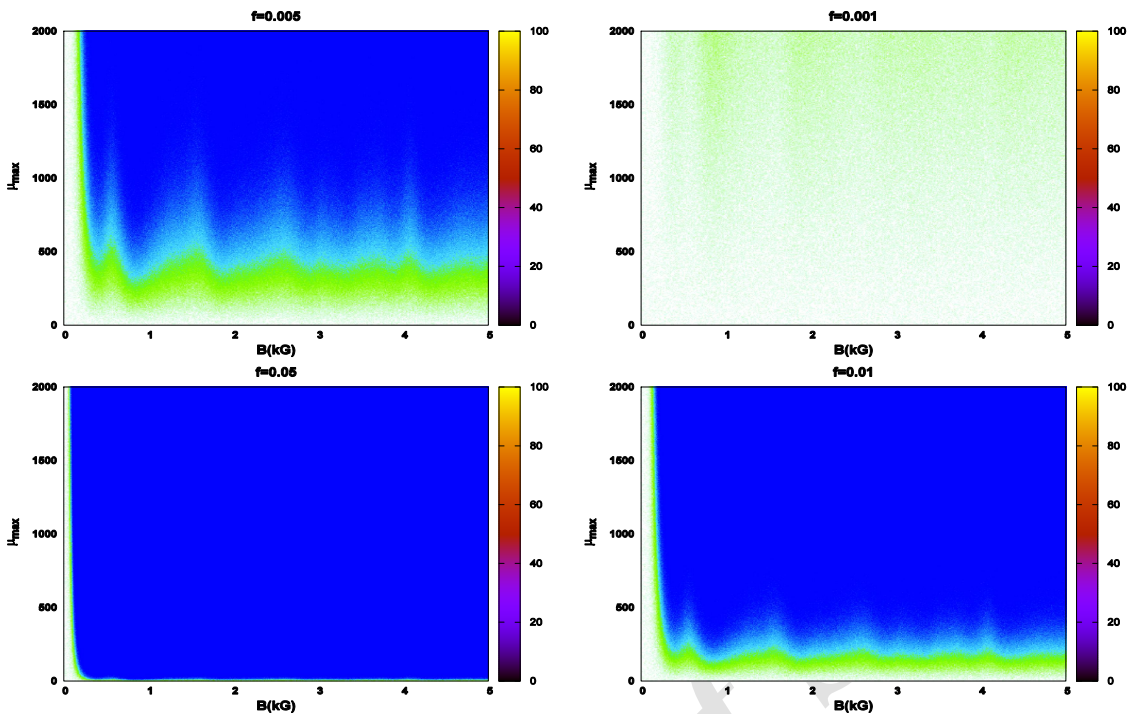
با استفاده از تابع توزیع گوسی، خطاهای تصادفی را روی خطوط طیفی قرار داده و به ازای میدان‌های مغناطیسی و اندازه لکه‌های مختلف، سیگنال میدان مغناطیسی را محاسبه می‌کنیم. سپس رویدادهای را که سیگنال میدان مغناطیسی آنها ۵ برابر خطا است، به عنوان رویدادهای قابل مشاهده جدا می‌کنیم. باید به این نکته اشاره کرد که اندازه لکه هنگام عبور از خط سوزان با زمان افزایش یافته و دوباره به میزان اولیه برمی‌گردد، بنابراین کمیت  $f$  در معادله (۱۴) به صورت میانگین آن در دو طرف خط سوزان محاسبه شده است. قابلیت مشاهده میدان مغناطیسی با استفاده از نسبت رویدادهای قابل مشاهده به کل رویدادها تعریف می‌شود. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی‌ها در استراتژی‌های در نظر گرفته شده و برای مقادیر مختلف اندازه لکه در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده است. نوار کناری

هنگام گذر از خط سوزان خواهیم پرداخت.

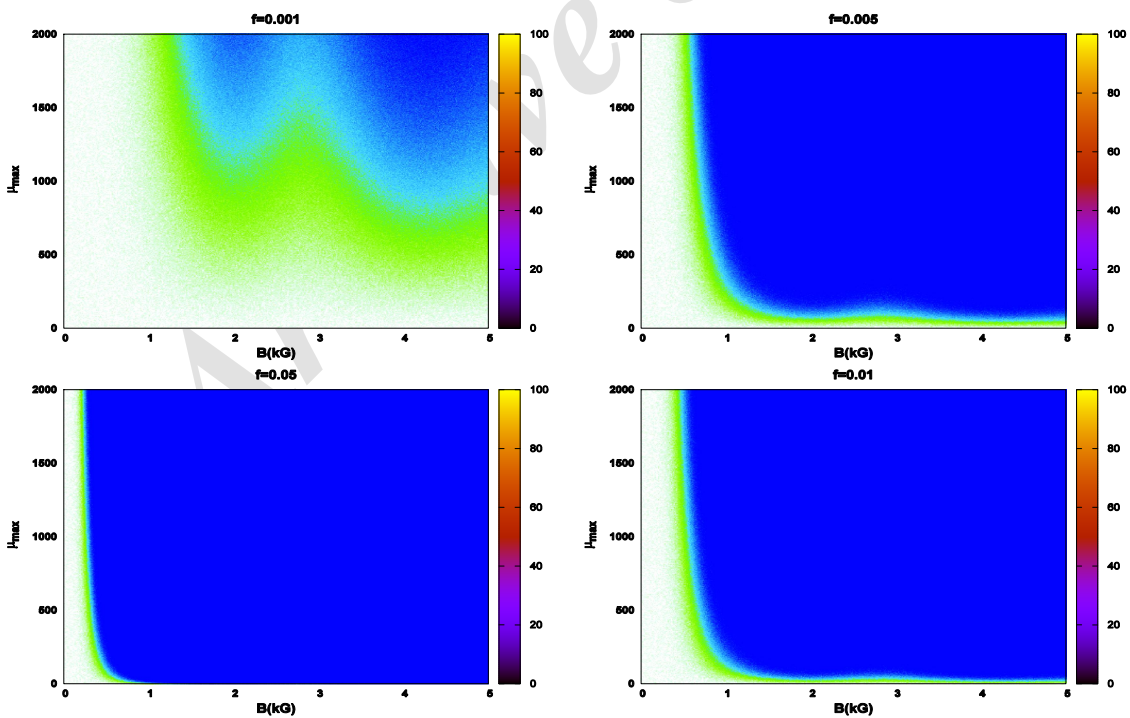
#### ۴. آشکار سازی میدان مغناطیسی

برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی به یک طیف‌سنج قدرتمند نیاز است. در این بخش دو استراتژی رصدی زیر را در نظر می‌گیریم.

- ۱- قدرت تفکیک یک کیلومتر بر ثانیه و نسبت سیگنال به نوفه ۲۰
  - ۲- قدرت تفکیک ۵ کیلومتر بر ثانیه و نسبت سیگنال به نوفه ۵۰
- که این مقادیر با طیف‌سنج‌های بسیار قدرتمند امروزی به سادگی قابل دسترس هستند. قدرت تفکیک و حساسیت یک طیف‌سنج برای یک ستاره با قدر مشخص، معلوم است. در واقع خطای اندازه‌گیری عکس سیگنال به نوفه است. قدرت تفکیک یک طیف‌سنج توسط رابطه  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$  داده می‌شود که می‌توان آن را با استفاده از رابطه  $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V}{C}$  به سرعت تبدیل کرد. حال با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو به بررسی امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی روی لکه می‌پردازیم. ابتدا تعداد بسیار زیادی از رویدادهای ریز همگرایی گرانشی با نسبت جرم و فاصله عدسی متفاوت تولید کرده و در گذر از خط سوزان هر یک از این رویدادها میزان سیگنال میدان مغناطیسی را محاسبه می‌کنیم. در این شبیه‌سازی از تابع توزیع یکنواخت برای نسبت جرم حول  $q \in [0.001, 0.1]$  و برای فاصله در بازه  $d \in [0.8, 1.2]$  استفاده شده است. همچنین برای کمترین فاصله عدسی و چشمه  $u_0$  از تابع توزیع یکنواخت حول صفر استفاده شده است. در این شبیه‌سازی مقدار زمان انیشتن ثابت و برابر ۲۰ روز در نظر گرفته شده است که یک مقدار نوعی برای رویدادهای ریز همگرایی گرانشی است. لازم به یادآوری است که تغییر توابع توزیع در این شبیه‌سازی نتایج این کار را به طور وسیع تغییر نخواهد داد، در این کار هدف مطالعه امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی در ریز همگرایی گرانشی است. باید به این نکته اشاره کرد که در این رویدادها مرکز لکه روی چشمه به صورت یک عدد تصادفی با احتمال برابر در تمام نقاط سطح چشمه مشخص می‌شود.



شکل ۲. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قابلیت مشاهده پذیری میدان مغناطیسی بر حسب بیشینه تقویت نور، برای چند لکه با اندازه‌های متفاوت در استراتژی اول.



شکل ۳. (رنگی در نسخه الکترونیکی) قابلیت مشاهده پذیری میدان مغناطیسی بر حسب بیشینه تقویت نور، برای چند لکه با اندازه‌های متفاوت در استراتژی دوم.

## ۵. نتیجه‌گیری و بحث

همگرایی گرانشی یک ابزار منحصر به فرد برای مطالعه اجرام فشرده و ستاره‌های چشمه فراهم می‌کند. با استفاده از تقویت نور حاصل از انحراف نور در میدان گرانشی، از یک سو می‌توان اطلاعاتی از اجرام فشرده که نقش عدسی را بازی می‌کنند، به دست آورد و از سوی دیگر به دلیل افزایش نور چشمه، می‌توان چشمه‌های کم نور را مورد مطالعه قرار داد. در این کار به بررسی امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی روی چشمه پرداختیم. با توجه به این نکته که هر چه اندازه چشمه کوچک‌تر باشد، تقویت نور آن بزرگ‌تر است، نتیجه گرفتیم که در هنگام عبور چشمه از خط سوزان اندازه لکه در مقایسه با اندازه چشمه چند برابر بزرگ‌تر می‌شود. این بزرگ شدن لکه احتمال مشاهده میدان مغناطیسی را افزایش می‌دهد. در ادامه برای مطالعه این اثر رویدادهای ریز همگرایی گرانشی با پارامترهای مختلف شبیه سازی کرده و برای لکه‌هایی با اندازه‌های متفاوت، قابلیت آشکار سازی میدان مغناطیسی را بررسی کردیم. دو استراتژی رصدی متفاوت در این کار در نظر گرفته شد و برای هر کدام قابلیت آشکار سازی میدان مغناطیسی به طور جداگانه محاسبه شد. نتایج نشان می‌دهند که با انجام طیف‌سنجی در هنگام عبور چشمه از خط سوزان می‌توان میدان مغناطیسی لکه چشمه را آشکار سازی کرد.

## قدردانی

ایده اولیه این کار توسط دکتر سهراب راهوار مطرح شده است. در اینجا لازم می‌دانیم از ایشان تشکر نماییم.

شکل میزان قابلیت مشاهده پذیری را بر حسب درصد نشان می‌دهد.

در استراتژی اول و برای یک لکه کوچک  $f = 0.01$  تقریباً با هیچ تقویت نور بیشینه‌ای نمی‌توان میدان مغناطیسی را مشاهده کرد. با بزرگ شدن اندازه لکه، قابلیت مشاهده پذیری میدان مغناطیسی افزایش می‌یابد و برای  $f = 0.05$  تمام میدان‌های مغناطیسی بزرگ‌تر از ۲۰۰ گوس قابل مشاهده هستند. در شکل‌های ۱ و ۲ محور افقی بزرگی میدان مغناطیسی بر حسب کیلو گوس و محور عمودی بیشینه تقویت نور در عبور از خط سوزان را نشان می‌دهد. برخلاف استراتژی اول، در استراتژی رصدی دوم، حتی لکه‌های کوچک با  $f = 0.01$  نیز قابل مشاهده هستند. دلیل این موضوع، خطای کوچک‌تر در استراتژی دوم است. در این استراتژی نیز مانند حالت اول با بزرگ شدن لکه احتمال مشاهده میدان‌های مغناطیسی بالاتر می‌رود ولی با دقت در قابلیت مشاهده پذیری با  $f = 0.05$  متوجه می‌شویم که در این استراتژی میدان‌های مغناطیسی کوچک قابل مشاهده نیستند. دلیل این موضوع به قدرت تفکیک پایین‌تر استراتژی دوم برمی‌گردد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این شبیه سازی‌ها، می‌توان نتیجه گرفت که برای آشکار سازی میدان‌های کوچک به قدرت تفکیک بالاتر و برای آشکار سازی میدان مغناطیسی روی لکه‌های کوچک به سیگنال به نوفه بالا تر احتیاج است. این نتایج همچنین نشان می‌دهند که با طیف‌سنجی ستاره چشمه در هنگام عبور از خط سوزان می‌توان میدان مغناطیسی روی لکه‌های آن را آشکار سازی کرد.

## مراجع

1. H J Witt and S Mao, *Apj*, **430** (1994) 505.
2. P Schneide and A Weiss, *A&A*, **171** (1987) 49.
3. M Dominik, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **377** (2007) 1679.
4. A Gould, *Publ. Astron. Soc. Pac.*, **113** (2001) 903.
5. S Rahvar, *Int. J. Mod. Phys. D*, **24**, (2015) 1530020.
6. G Hale, *Astrophys. J.*, **28**, (1908) 315.
7. S V Berdyugina, *Living Rev. Sol. Phys.*, **2**, (2005) 8.
8. F Favata, F Reale, G Micela, *Sciortino Silvio*., et al.,
9. *Astron. Astrophys.*, **353** (2000) 9.
9. G W Preston, *ApJ*, **164** (1971) 309.
10. J R D Robinson, *ApJ*, **239** (1980) 961.
11. P Schneider, *A&A*, **143** (1985) 413.
12. A Reiners, *Living Rev. Solar Phys.*, **8** (2012) 1.
13. H W Babcock, *ApJ*, **110** (1949) 126.
14. S H Saar, , *ApJ*, **324** (1988) 441.
15. G W Marcy, *ApJ*, **245** (1981) 624.