

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

احمد مهرابی^۱، حبیب خسروشاهی^۲ و هادی رحمانی^۳

۱. دانشگاه بوعلی سینا، همدان

۲. پژوهشگاه دانش‌های بنیادی، تهران

۳. دانشگاه آیکس مارسل، مارسل، 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 زیمن^۱ 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 زیمن 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 کهکشانی 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

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 زیمن، 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 زیمن 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^۱ روش مفیدی برای اندازه‌گیری میدان مغناطیسی ستاره‌ها در اثر شکافتگی زیمن 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

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^۲، هارپس^۳ و هایرس^۴ 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].

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

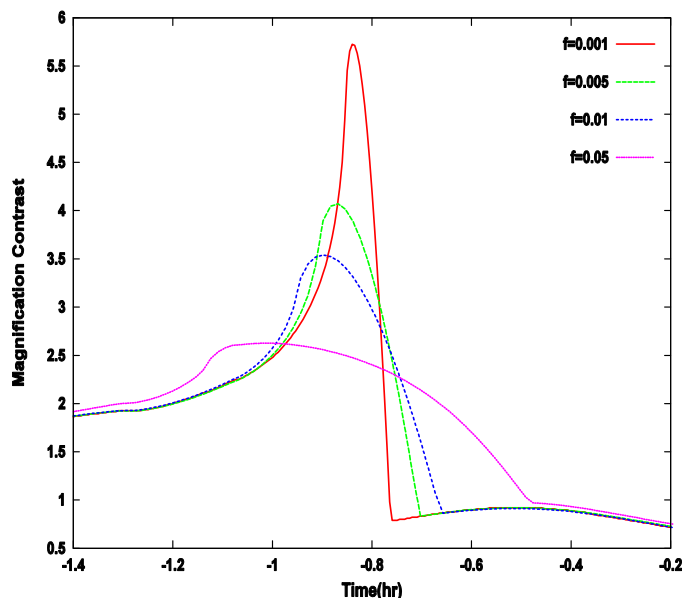
در اینجا $\kappa(X)$ چگالی سطحی جرم در صفحه عدسی است و تمام فواصل به یک مقیاس طول به نام شعاع انیشتن به هنجار

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 اندازه های متفاوت.

مشخص می کنند و با صفر قرار دادن دترمینان ماتریس ژاکوبی حاصل می شوند.

تقویت نور برای یک چشمه گسترده با انتگرال گیری روی سطح چشمه به دست می آید و همان طور که در ابتدا ذکر کردیم برای عدسی های دوتایی و بیشتر، این تقویت نور را نمی توان با استفاده از توابع تحلیلی بیان کرد. از این رو برای محاسبه تقویت نور در این کار از روش شبکه بهینه استفاده شده است [۳]. حال فرض می کنیم روی چشمه یک لکه دایره ای قرار دارد که مساحت آن A_s است. نسبت مساحت لکه به مساحت کل چشمه را با کمیت f نشان می دهیم. با توجه به این نکته که هر چقدر چشمه کوچک تر باشد، تقویت نور آن در گذر از خط سوزان، بزرگ تر خواهد بود، انتظار داریم هنگام عبور یک چشمه شامل لکه از خط سوزان، تقویت نور لکه نسبت به کل چشمه بزرگ تر 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 اندازه های 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 می آید.

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

در این رابطه، M ، D_s و p به ترتیب جرم عدسی، فاصله چشمه و نسبت فاصله عدسی به چشمه را نشان می دهند. معادله عدسی توسط رابطه زیر داده می شود و با استفاده از آن می توان محل تصاویر را مشخص کرد.

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

در اینجا Y مکان چشمه را نشان می دهد و حروف بزرگ انگلیسی برای بردارهای دو بعدی به کار برده شده است. در همگرایی گرانشی اثر انحراف نور را می توان 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 می آید.

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

حال برای به دست آوردن تقویت نور کل، باید روی تمام تصاویر جمع بزنیم. همان طور که در بالا ذکر شد، در صفحه چشمه، می توان نقاطی را یافت که تقویت نور یک چشمه نقطه ای در آنها بی نهایت است. این نقاط خطوط سوزان را

افزایش نسبت مساحت‌ها است. همان طور 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 زیمن). 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.

$$F_m(\lambda) = F_0(\lambda) * \left[\frac{a}{\gamma} \delta(\lambda - \Delta\lambda) + \frac{a}{\gamma} \delta(\lambda + \Delta\lambda) + b \delta(\lambda) \right]. \quad (5)$$

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].

$$a = 0.5(1 + \cos^2 \gamma), b = 0.5 \sin^2 \gamma. \quad (6)$$

زاویه γ 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.

$$\Delta\lambda = 35/84 \left(\frac{g}{1/2} \right) \left(\frac{\lambda_0}{0.8 \mu m} \right)^2 \left(\frac{B}{1 KG} \right) mA. \quad (7)$$

در این رابطه میدان مغناطیسی به هزار گوس به هنجار شده است و میزان جابه‌جایی بر حسب میلی آنگستروم است. بر اساس

معادله (۷) طول موج‌های بزرگ‌تر جابه‌جایی طیفی بیشتری دارند. در نتیجه استفاده از خطوط طیفی در محدوده فروسرخ، از محدوده اپتیکی مناسب‌تر است. برای مثال خطوط طیفی حساس FeI در 1.56 میکرومتر و TiI در 2.22 میکرومتر دو خط طیفی مناسب برای مشاهده میدان مغناطیسی هستند.

همان طور که در بالا ذکر شد علاوه بر جابه‌جایی زیمن، 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 پهن شدگی 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.

$$P(\lambda) = R(\lambda) * V(\lambda) * M(\lambda) * I(\lambda). \quad (8)$$

در فضای فوریه این رابطه به صورت زیر در می‌آید.

$$p(k) = r(k) v(k) m(k) i(k). \quad (9)$$

در اینجا حروف کوچک نشان دهنده 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.

$$R(\lambda) = f R_m(\lambda) + (1-f) R_0(\lambda). \quad (10)$$

تبدیل فوریه این رابطه به صورت

$$r(k) = r_0(k) [f a(\cos(2\pi \Delta\lambda k) - 1) + 1], \quad (11)$$

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

$$\frac{p(g_1, k)}{p(g_2, k)} = \frac{r(g_1, k)}{r(g_2, k)}, \quad (12)$$

در نتیجه تمام اثرات مخرب پهن شدگی به جز اثر زیمن 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

هنگام گذر از خط سوزان خواهیم پرداخت.

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 می دهد. کمیت های $r_0^{sen}(k)$ و $r_0^{ins}(k)$ توابع طیفی حساس و غیرحساس را نشان می دهند 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 می آید.

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

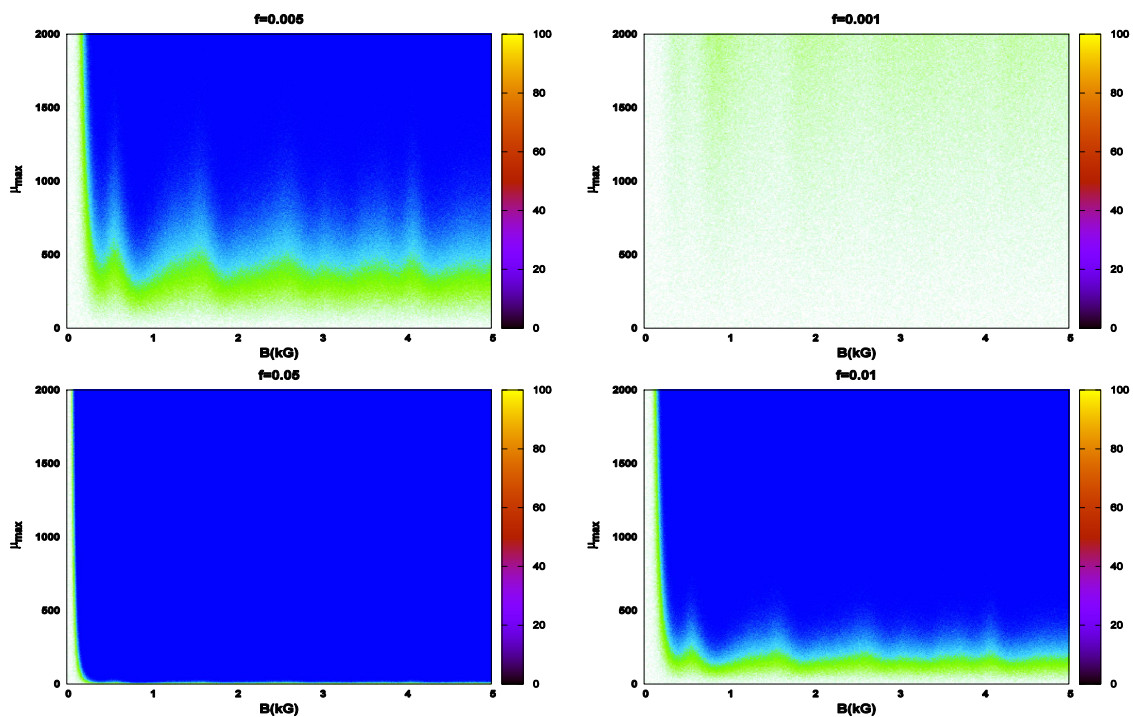
برای محاسبه جابه جایی طیف در خط حساس و غیرحساس به ترتیب از $g_1 = 2/5$ و $g_2 = 1$ در طول موج $\lambda = 0.8 \mu m$ استفاده شده است. برای محاسبه کمیت a در این رابطه، از متوسط زاویه بین میدان مغناطیسی و راستای دید $\gamma = 34^\circ$ که توسط [۱۵] به دست آمده، استفاده شده است. هنگامی که میدان مغناطیسی 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 میدان های مغناطیسی و اندازه لکه های مختلف، سیگنال میدان مغناطیسی را محاسبه می کنیم. سپس رویدادهای را که سیگنال میدان مغناطیسی آنها ۵ برابر خطا است، به عنوان رویدادهای قابل مشاهده جدا می کنیم. باید به این نکته اشاره کرد که اندازه لکه هنگام عبور از خط سوزان با زمان افزایش یافته و دوباره به میزان اولیه برمی گردد، 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 می شود. نتایج حاصل از این شبیه سازی ها در استراتژی های در نظر گرفته شده و برای مقادیر مختلف اندازه لکه در شکل های ۲ و ۳ نشان داده شده است. نوار کناری

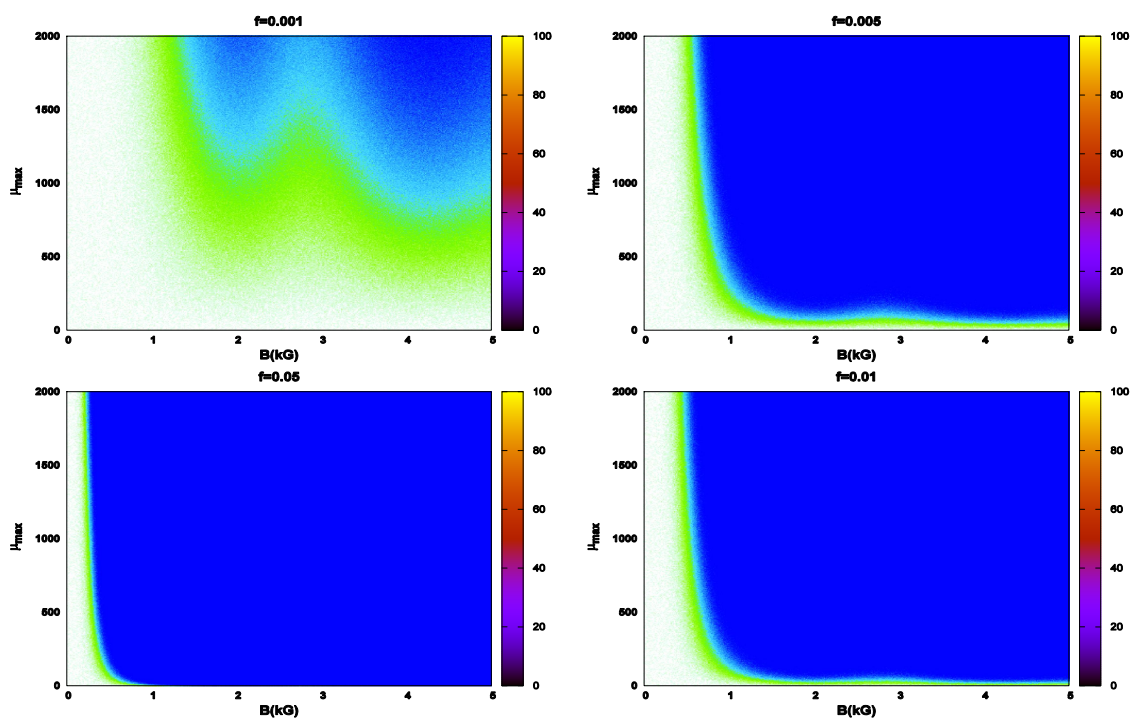
۴. آشکار سازی میدان مغناطیسی

برای اندازه گیری میدان مغناطیسی به یک طیف سنج قدرتمند نیاز است. در این بخش دو استراتژی رصدی زیر را در نظر می گیریم.

- 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 طیف سنج های بسیار قدرتمند امروزی به سادگی قابل دسترس هستند. قدرت تفکیک و حساسیت یک طیف سنج برای یک ستاره با قدر مشخص، معلوم است. در واقع خطای اندازه گیری عکس سیگنال به نوفه است. قدرت تفکیک یک طیف سنج توسط رابطه $\frac{\Delta\lambda}{\lambda}$ داده می شود که می توان آن را با استفاده از رابطه $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V}{C}$ به سرعت تبدیل کرد. حال با استفاده از شبیه سازی مونت کارلو به بررسی امکان آشکار سازی میدان مغناطیسی روی لکه می پردازیم. 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 می کنیم. در این شبیه سازی از تابع توزیع یکنواخت برای نسبت جرم حول $q \in [0.0001, 0.01]$ و برای فاصله در بازه $d \in [0.8, 1.2]$ استفاده شده است. همچنین برای کمترین فاصله عدسی و چشمه u از تابع توزیع یکنواخت حول صفر استفاده شده است. در این شبیه سازی 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 شبیه سازی 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 می شود.



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. نتیجه گیری و بحث

همگرایی گرانشی یک ابزار منحصر به فرد برای مطالعه اجرام فشرده و ستاره های چشمه فراهم می کند. با استفاده از تقویت نور حاصل از انحراف نور در میدان گرانشی، از یک سو می توان اطلاعاتی از اجرام فشرده که نقش عدسی را بازی می کنند، به دست آورد و از سوی دیگر به دلیل افزایش نور چشمه، می توان چشمه های 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 کوچک تر باشد، تقویت نور آن بزرگ تر است، نتیجه گرفتیم که در هنگام عبور چشمه از خط سوزان اندازه لکه در مقایسه با اندازه چشمه چند برابر بزرگ تر می شود. این بزرگ شدن لکه احتمال مشاهده میدان مغناطیسی را افزایش می دهد. در ادامه برای مطالعه این اثر رویدادهای ریز همگرایی گرانشی با پارامترهای مختلف شبیه سازی کرده و برای لکه هایی با اندازه های 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 مغناطیس به طور جداگانه محاسبه شد. نتایج نشان می دهند که با انجام طیف سنجی در هنگام عبور چشمه از خط سوزان می توان میدان مغناطیسی لکه چشمه را آشکار سازی کرد.

قدردانی

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

شکل میزان قابلیت مشاهده پذیری را بر حسب درصد نشان می دهد.

در استراتژی اول و برای یک لکه کوچک $f = 0.01$ تقریباً با هیچ تقویت نور بیشینه ای نمی توان میدان مغناطیسی را مشاهده کرد. با بزرگ شدن اندازه لکه، قابلیت مشاهده پذیری میدان مغناطیسی افزایش می یابد و برای $f = 0.05$ تمام میدان های مغناطیسی بزرگ تر از ۲۰۰ گوس قابل مشاهده هستند. در شکل های 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 می دهد. برخلاف استراتژی اول، در استراتژی رصدی دوم، حتی لکه های کوچک با $f = 0.01$ نیز قابل مشاهده هستند. دلیل این موضوع، خطای کوچک تر در استراتژی دوم است. در این استراتژی نیز مانند حالت اول با بزرگ شدن لکه احتمال مشاهده میدان های مغناطیسی بالاتر می رود ولی با دقت در قابلیت مشاهده پذیری با $f = 0.05$ متوجه می شویم که در این استراتژی میدان های مغناطیسی کوچک قابل مشاهده نیستند. دلیل این موضوع به قدرت تفکیک پایین تر استراتژی دوم برمی گردد.

با توجه به نتایج به دست آمده از این شبیه سازی ها، می توان نتیجه گرفت که برای آشکار سازی میدان های کوچک به قدرت تفکیک بالاتر و برای آشکار سازی میدان مغناطیسی روی لکه های کوچک به سیگنال به نوفه بالا تر احتیاج است. این نتایج همچنین نشان می دهند که با طیف سنجی ستاره چشمه در هنگام عبور از خط سوزان می توان میدان مغناطیسی روی لکه های 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.
10. G W Preston, *ApJ*, **164** (1971) 309.
11. J R D Robinson, *ApJ*, **239** (1980) 961.
12. P Schneider, *A&A*, **143** (1985) 413.
13. A Reiners, *Living Rev. Solar Phys.*, **8** (2012) 1.
14. H W Babcock, *ApJ*, **110** (1949) 126.
15. S H Saar, *ApJ*, **324** (1988) 441.
16. G W Marcy, *ApJ*, **245** (1981) 624.