

اثر اختلال لکه‌های ستاره‌ای بر منحنی نوری رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی

صدیقه سجادیان و مهشاد رشیدی

دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: s.sajadian@cc.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۹؛ دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۹/۱۰/۰۲)

چکیده

یکی از مزیت‌های رصدهای ریزهمگرایی گرانشی، آشکارسازی لکه‌های ستاره‌ای است. هدف ما در این مقاله بررسی اثر اختلال ناشی از لکه بر روی منحنی نوری رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی است. برای این کار ابتدا یک فرمول‌بندی مناسب در نظر گرفتیم که لکه را بر روی سطح ستاره شبیه‌سازی کردیم. یکی از اثرهای لکه بر روی منحنی نوری ستاره، کاهش موضعی ضریب تقویت نور است (زمانی که عدسی از روی لکه عبور می‌کند) و این کاهش در ضریب تقویت نور باعث می‌شود منحنی نوری نسبت به زمان کمترین فاصله تقارن نداشته باشد. لکه‌هایی که پس از تصویر شدن در مرکز ستاره چشمه واقع می‌شوند، اثر اختلال طولانی‌تر و بزرگ‌تری نسبت به لکه‌های مشابه که در لبه ستاره قرار می‌گیرند ایجاد می‌کنند. در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی دوتایی با گذر سوزان اختلال نسبی ایجاد شده در بیش از ۴۰ درصد رویدادهای شبیه‌سازی شده، بیش از ۵۰٪ درصد بود. البته این کسر در رویدادهای همگرایی گرانشی تکی بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: ریزهمگرایی گرانشی، لکه‌های ستاره‌ای، روش عددی

۱. مقدمه

در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی فاصله چشمه، ناظر و عدسی گرانشی خیلی بزرگ‌تر از ابعادشان است پس می‌توانیم آنها را به صورت جسم نقطه‌ای در نظر بگیریم. همچنین در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی فاصله تصاویر ایجاد شده از هم به قدری کم است که حتی تلسکوپ‌های فضایی نیز قادر به تشخیص آن نیستند، بنابراین ما مجموع نور دو تصویر را دریافت می‌کنیم که نسبت به نور ستاره چشمه تقویت شده است [۱، ۲ و ۳].

خم شدن نور توسط میدان گرانشی یک جسم سنگین که باعث ایجاد دو یا چند تصویر از ستاره چشمه می‌شود را همگرایی گرانشی^۱ می‌گوییم و جسم سنگینی که این همگرایی را ایجاد می‌کند عدسی گرانشی^۲ می‌نامیم. همگرایی گرانشی یکی از نتایج نسبت عام اینشتین است. اگر همگرایی گرانشی در ابعاد کهکشانی اتفاق بیفتد آن را ریزهمگرایی گرانشی^۳ می‌گوییم.

۱. Gravitational Lensing

۲. Gravitational Lens

۳. Gravitational Microlensing

$$\begin{pmatrix} u_{1s} \\ u_{r_s} \\ u_{r_s} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_s \\ y_s \\ z_s \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} u_{1*} \\ u_{r_s} \\ u_{r_s} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

در رابطه بالا (u_{1*}, u_{r_s}) مختصات یک نقطه از ستاره چشمه در صفحه آسمان و (x_s, y_s, z_s) مختصات یک نقطه از لکه در دستگاه مختصات سه بعدی هستند که به ترتیب برابرند با $x_s = \rho_s \sin P_1 \cos P_r$ ، $y_s = \rho_s \sin P_1 \sin P_r$ و $z_s = \rho_s \cos P_1$. همچنین $\rho_s = r_s \rho_*$ و ρ_* در واقع همان شعاع ستاره است که به شعاع اینشتین بهنجار شده است.

$$\rho_* = \frac{R_*}{R_E} \times \frac{D_l}{D_s}, \quad (4)$$

با این که در صفحه آسمان ستاره و لکه را به صورت دوی بعدی در نظر می‌گیریم اما می‌توان تعبیر فیزیکی مناسبی برای u_{r_s} نیز داشت؛ بدین ترتیب اگر $u_{r_s} > 0$ باشد یعنی لکه روی ستاره و به سمت ناظر است و اگر $u_{r_s} < 0$ باشد یعنی لکه در پشت ستاره قرار دارد. برای درک بهتر موقعیت نسبی دستگاه مختصات آسمان و ستاره و همچنین موقعیت ستاره و لکه در هر کدام از دستگاه مختصات می‌توانید به شکل ۱ و ۲ مراجعه کنید. یکی دیگر از پارامترهای مهم برای شبیه سازی سیستم درخشندگی نسبی^۲ لکه است که برابر است با نسبت درخشندگی لکه به درخشندگی ستاره چشمه. مقدار این پارامتر همیشه کمتر از ۱ است.

$$fraction = \frac{L_{spot}}{L_{star}}, \quad (5)$$

گام بعدی در نظر گرفتن عدسی گرانشی است. سیستم را برای دو حالت مدل می‌کنیم: الف) عدسی تکی ب) عدسی دوتایی. هر دو حالت را به طور کامل در قسمت‌های جداگانه بررسی می‌کنیم. در هر دو حالت هدف ما به دست آوردن منحنی نوری بدون حضور و با حضور لکه است.

الف) عدسی تکی

سیستم را در حالتی بررسی می‌کنیم که مکان ستاره چشمه ثابت و عدسی در حال عبور از روی ستاره یا مجاورت آن باشد.

هنگامی که چرخش ستاره با جریان همرفتی پلازما جفت می‌شود، یک میدان مغناطیسی قوی درون ستاره به وجود می‌آید. میدان مغناطیسی ستاره سبب ایجاد تابش‌های سنکروترونی می‌کند. این تابش‌ها ذرات را به فضای بیرون ستاره پرتاب می‌کنند و باعث کاهش دما در آن ناحیه از سطح ستاره می‌شوند. در اثر کاهش دما، درخشندگی ناحیه نیز کاهش می‌یابد و قسمتی از سطح ستاره تاریک‌تر به نظر می‌آید که اصطلاحاً آن را "لکه ستاره"^۱ می‌نامیم [۴ و ۵]. در این مقاله سعی کردیم با در نظر گرفتن اثر ریزهمگرایی گرانشی اختلال‌های ناشی از وجود لکه در سطح ستاره را شبیه‌سازی و نتایج آن را تفسیر کنیم.

۲. مدل کردن لکه بر روی ستاره

ستاره‌ها اجرام سه بعدی هستند اما ما آنها را به صورت دو بعدی در صفحه آسمان می‌بینیم؛ بنابراین اولین قدم برای مدل کردن سیستم تبدیل دستگاه مختصات سه بعدی (دستگاه مختصات همراه ستاره) به دستگاه مختصات دو بعدی (صفحه آسمان) است [۶]. اگر (x, y, z) مختصات یک نقطه از ستاره باشند تصویر این نقطه در صفحه آسمان از روابط زیر به دست می‌آید:

$$\begin{pmatrix} x_o \\ y_o \\ z_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}, \quad (1)$$

که φ و θ زوایای اوپلر برای تبدیل دستگاه مختصات هستند.

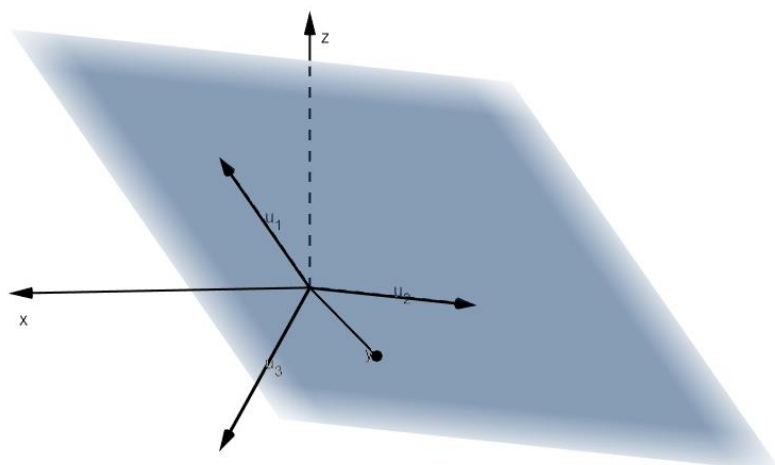
زاویه فضایی که موقعیت لکه را روی سطح ستاره مشخص می‌کند نیز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\theta_o = \sin^{-1} \frac{r_s}{R_*}, \quad (2)$$

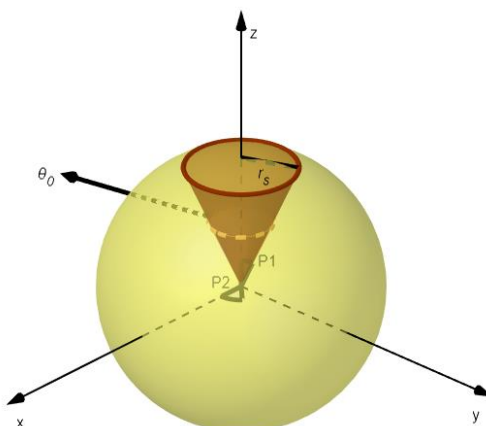
r_s و R_* در این رابطه به ترتیب شعاع لکه و شعاع ستاره چشمه هستند. برای ساده‌سازی مسئله ستاره‌ای را در نظر می‌گیریم که لکه در قطب آن قرار دارد. با توجه به رابطه (۱) مختصات لکه در صفحه آسمان را می‌توان به این صورت نوشت:

۲. Fraction

۱. Stellar spot



شکل ۱. صفحه آبی رنگ در واقع همان دستگاه مختصات آسمان است و مؤلفه سوم آن یعنی، u_3 که به سمت ناظر است مشخص کننده موقعیت لکه است.



شکل ۲. مخروط قهوه‌ای رنگ موقعیت لکه بر روی ستاره چشمه است. هرچه θ_0 بزرگ‌تر باشد، لکه مساحت بزرگ‌تری از سطح ستاره را پوشش می‌دهد.

پارامتر برخورد، اندازه لکه، موقعیت نسبی لکه و درخشندگی نسبی آن کمیت‌هایی هستند که در این مرحله برای ما اهمیت دارند. داده‌های به دست آمده را با توجه به این چهار کمیت دسته‌بندی کردیم که در قسمت‌های بعدی به تفصیل راجع به آنها بحث خواهیم کرد.

ب) عدسی دوتایی

در این قسمت به جای ستاره چشمه مکان عدسی‌ها را ثابت در نظر می‌گیریم و حرکت ستاره را نسبت به مرکز عدسی‌ها

برای ساده‌سازی مسئله، یکی از مؤلفه‌های مختصات مسیر عدسی را ثابت و مؤلفه دیگر را برابر $\frac{\Delta t}{t_E} v$ در نظر می‌گیریم که t مدت زمان عبور عدسی و Δt یک المان از آن است. با توجه به روابط فوق می‌توانیم مختصات سیستم را در صفحه آسمان به دست آوریم و ضریب تقویت نور را با استفاده از فرمول زیر محاسبه کنیم:

$$A = \frac{u^2 + r^2}{u\sqrt{u^2 + r^2}}, \quad (6)$$

$$u = \sqrt{u_{rs}^2 + u_{rs}^2}, \quad (7)$$

جدول ۱. درصد نمونه‌هایی که اختلاف نسبی آنها از مقادیر بحرانی بیشتر است.

عدسی تکی	$25^\circ < \theta_c < 35^\circ$	$1^\circ < \theta_c < 15^\circ$
$\Delta > 20$	۲۱/۷۴٪	۰٪
$\Delta > 15$	۳۹/۱۳٪	۷/۱۴٪
$\Delta > 10$	۴۷/۸۲٪	۲۱/۴۳٪

جدول ۲. احتمال عبور عدسی از روی لکه.

عدسی تکی	$25^\circ < \theta_c < 35^\circ$	$1^\circ \leq \theta_c \leq 15^\circ$
عبور از سطح ستاره چشمه	۷۳/۹٪	۵۰٪
چشمه ستاره عبور از کنار	۲۶/۱٪	۵۰٪

خیلی بزرگ باشد تقریباً تمام سطح ستاره را می‌پوشاند و عملاً همه نمودارهای به دست آمده مانند هم خواهند شد و اگر اندازه لکه خیلی کوچک باشد قابل آشکارسازی نیست و خیلی از شبیه‌سازی‌های ما نادرست خواهند بود. برای بررسی اثر اختلال ایجاد شده ناشی از لکه بر روی منحنی نوری پارامتری به نام اختلاف نسبی در ضریب تقویت نور مطابق زیر تعریف می‌کنیم:

$$\Delta[\%] \equiv \frac{|A_{spot} - A_*|}{A_*} \times 100, \quad (10)$$

۴. عدسی تکی (تحلیل آماری)

سه مقدار بحرانی برای بیشینه مقدار اختلاف نسبی ایجاد شده در ضریب تقویت نور ناشی از وجود لکه در نظر می‌گیریم که عبارتند از ۱۰، ۱۵، ۲۰. با توجه به نتایج به دست آمده هر چه اختلاف نسبی در ضریب تقویت نور بیشتر باشد، احتمال آشکارسازی لکه بیشتر است (جدول ۱).

با توجه به نتایج به دست آمده (شکل ۳)، هرچه اندازه لکه بزرگ‌تر باشد احتمال عبور عدسی از روی لکه و آشکارسازی آن بیشتر است. همچنین برای حالت‌هایی که اندازه لکه بزرگ‌تر است (شکل ۴)، حتی اگر عدسی از روی لکه عبور نکند اختلال ناشی از لکه در منحنی نوری ستاره مشهود است؛ اما با کوچک

بررسی می‌کنیم. با توجه به تأثیر هر دو عدسی بر نور ستاره چشمه، زاویه خمش دارای دو مؤلفه می‌شود؛ بنابراین روابط مربوط به عدسی دوتایی نسبت به حالت قبل پیچیده‌تر است. معادله عدسی و ضریب تقویت نور به ترتیب در زیر آورده شده‌اند:

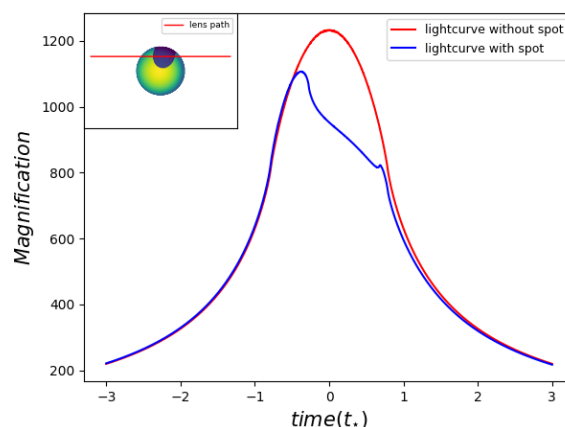
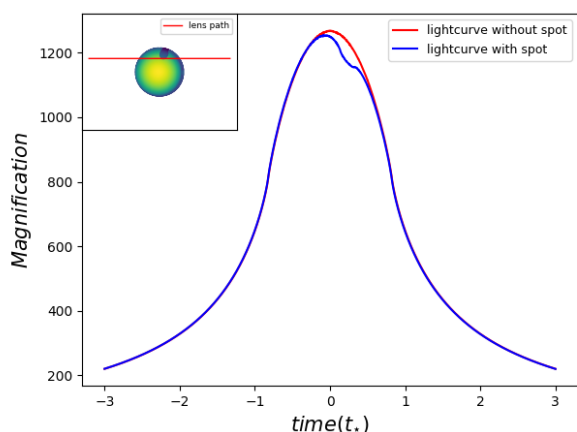
$$\bar{w} = \bar{z} - m_l \frac{1}{z - z_l} - m_r \frac{1}{z - z_r}, \quad (8)$$

$$A = |\det J|^{-1}, \quad (9)$$

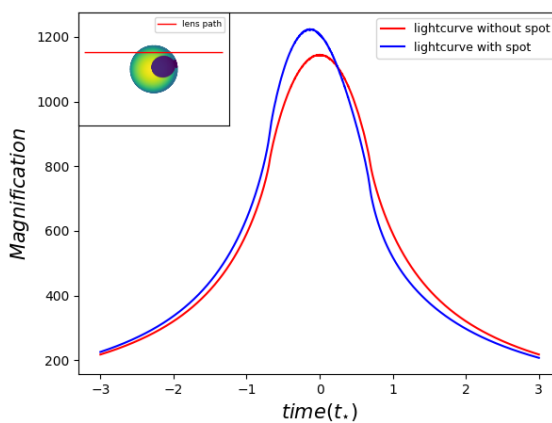
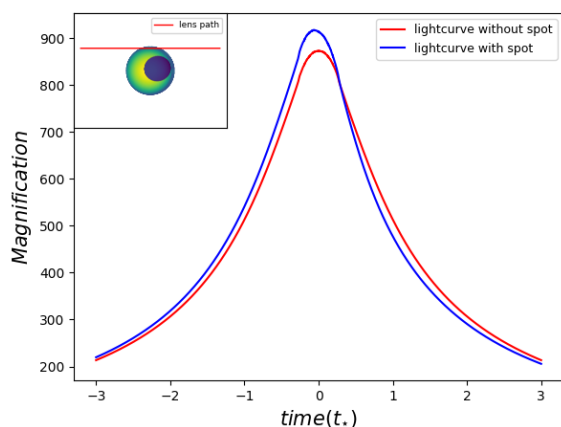
در رابطه (۸)، m_i زاویه خمش نور، z_i مکان عدسی، z مکان مرکز جرم عدسیها در صفحه عدسی و w مکان ستاره چشمه در صفحه ستاره است. برای این حالت علاوه بر منحنی نوری، منحنی سوزان را به دست آوردیم. همچنین کمیت‌های مهم این قسمت مانند عدسی تکی است با این تفاوت که پارامتر برخورد را حذف و به جای آن احتمال عبور ستاره از منحنی سوزان را محاسبه کردیم.

۳. تحلیل داده‌ها

ما شبیه‌سازی را برای دو حالت الف) $25^\circ \leq \theta_c \leq 35^\circ$ و ب) $1^\circ \leq \theta_c \leq 15^\circ$ انجام دادیم. مقادیر بحرانی θ_c را طوری انتخاب کردیم که هم لکه قابل آشکارسازی و هم نتایج به دست آمده قابل اطمینان باشد. به این ترتیب اگر اندازه لکه



شکل ۳. منحنی نوری دو سیستم شبیه‌سازی مشابه که فقط اندازه لکه آنها متفاوت است.



شکل ۴. منحنی نوری سیستمی که اندازه لکه آن نسبتاً بزرگ است و عدسی از روی آن عبور نکرده است.

شکل ۵. منحنی نوری ستاره‌ای که لکه تقریباً در مرکز آن قرار دارد و عدسی از روی آن عبور نکرده است.

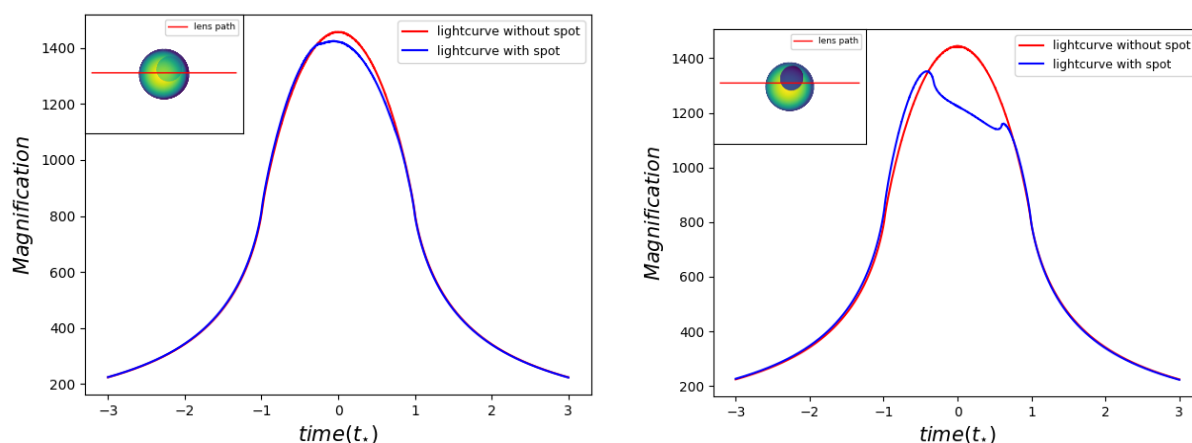
می‌کند، پس احتمال مشاهده آنها بیشتر است. لکه‌هایی که در لبه ستاره چشمه هستند (شکل ۵) به دلیل فرایند تصویر شدن تغییر شکل می‌دهند و به شکل بیضی گون در می‌آیند. همین امر باعث می‌شود که تقارن منحنی نوری نیز شکسته شود.

با توجه به تعداد زیادی منحنی نوری شبیه‌سازی شده، نتیجه می‌گیریم برای حالتی که عدسی از روی لکه عبور نکند تقارن منحنی نوری نسب به زمان کمترین فاصله از بین می‌رود؛ مگر این که لکه دقیقاً در مرکز ستاره چشمه باشد که این مورد خیلی نادر است (شکل ۵). یکی از پارامترهایی که لکه را با آن مشخص کردیم، درخشندگی نسبی است. با توجه به نتایج به

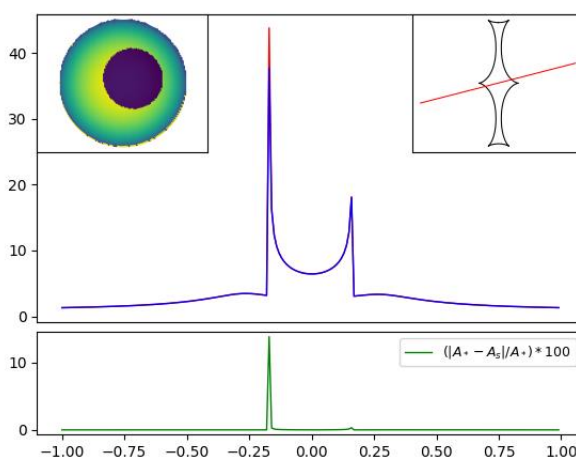
شدن لکه فقط در صورتی اختلال‌ها را مشاهده می‌کنیم که عدسی دقیقاً از روی لکه عبور کرده باشد (جدول ۲).

۵. عدسی تکی (مشخصه‌یابی اختلال‌ها).

لکه‌هایی که در مرکز ستاره چشمه هستند (شکل ۵) اندازه بزرگ‌تری دارند. از طرف دیگر به دلیل اثر تاریکی، لبه مرکز ستاره چشمه از بقیه نقاط پر نورتر به نظر می‌آید. این دو اثر باعث می‌شود لکه‌هایی که در مرکز ستاره واقع شده‌اند اختلال عمیق‌تر و پهن‌تری در درخشندگی ستاره چشمه ایجاد کنند. همچنین اختلال ناشی از آنها تقارن منحنی نوری را حفظ



شکل ۶. منحنی نوری دو سیستم شبیه‌سازی مشابه که فقط درخشندگی نسبی لکه آنها متفاوت است.



شکل ۷. منحنی نوری، منحنی سوزان و مسیر عبور ستاره و اختلاف نسبی درخشندگی سیستمی در حالت آرمانی.

ناشی از لکه در موارد کمی قابل تشخیص است. این اختلاف زمانی خیلی مشهود است که اندازه لکه بزرگ، موقعیت آن در مرکز ستاره و درخشندگی آن کم باشد یعنی ایده‌آل‌ترین حالت ممکن (شکل ۷).

۷. عدسی دوتایی (مشخصه یابی لکه)

همان طور که در قسمت تحلیل آماری توضیح دادیم لکه‌هایی که در مرکز ستاره چشمه قرار دارند و تاریک‌تر هستند قابل تشخیص‌اند. همچنین اختلاف نسبی درخشندگی لکه‌های کوچک به قدری کم است که در عمل می‌توان ادعا کرد که قابل تشخیص نیستند (شکل ۸).

دست آمده، هرچه لکه تاریک‌تر باشد اثر اختلال آن مشهودتر و در نتیجه احتمال آشکار سازی آن بیشتر است (شکل ۶). این نتایج را می‌توان به حالت عدسی دوتایی نیز تعمیم داد با این تفاوت که علاوه بر منحنی نوری، منحنی سوزان را هم بررسی می‌کنیم. همچنین باید این نکته را متذکر شویم، مقادیر بحرانی در حالت عدسی دوتایی کمتر است و علت آن بزرگ بودن ابعاد کل سیستم نسبت به ابعاد ستاره چشمه است.

۶. عدسی دوتایی (تحلیل آماری)

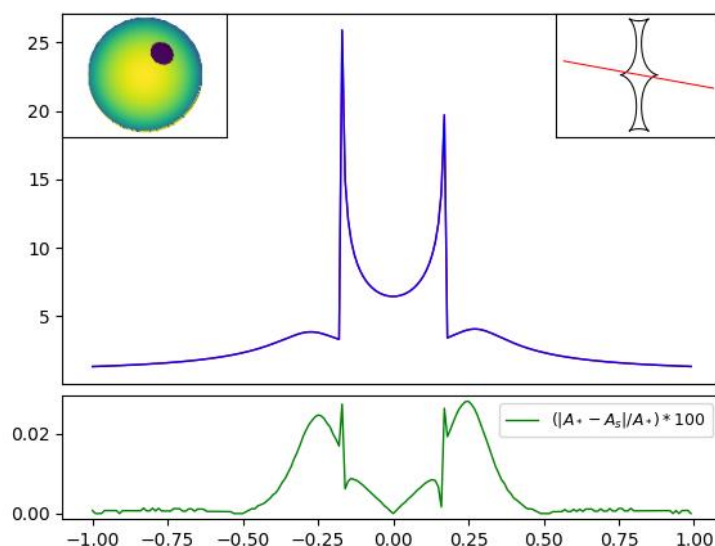
مقادیر بحرانی در حالت عدسی دوتایی به ترتیب برابر ۱۵، ۱۰ و ۵ است (جدول ۳). با توجه به نتایج به دست آمده، اختلال

جدول ۳. رصد نمونه‌هایی که اختلاف نسبی آنها از مقادیر بحرانی بیشتر است.

عدسی دوتایی	$25^\circ < \theta_s < 35^\circ$	$1^\circ \leq \theta_s \leq 15^\circ$
$\Delta > 15$	۰٪	۰٪
$\Delta > 10$	۱۰٪	۱۰٪
$\Delta > 5$	۴۰٪	۲۰٪

جدول ۴. احتمال عبور ستاره از منحنی سوزان.

عدسی دوتایی	$25^\circ < \theta_s < 35^\circ$	$1^\circ \leq \theta_s \leq 15^\circ$
عبور از منحنی سوزان	۸۰٪	۸۰٪
عبور از کنار منحنی سوزان	۲۰٪	۲۰٪



شکل ۸. منحنی نوری، منحنی سوزان و مسیر عبور ستاره و اختلاف نسبی درخشندگی

۸. نتیجه‌گیری

در قسمت‌های بالا حالت‌های مختلف را بررسی کردیم و نتیجه کلی را می‌توان به این صورت ارائه داد:

اختلال مشاهده شده در منحنی نوری می‌تواند ناشی از عوامل زیادی باشد. اگر بتوانیم این اختلال‌ها را حذف یا شناسایی کنیم با احتمال زیاد می‌توانیم لکه‌های موجود در سطح ستاره‌ها را آشکارسازی کنیم. نسل جدید ماهواره‌ها و

نکنه دیگری که در حالت عدسی دوتایی باید به آن توجه کرد عبور ستاره چشمه از منحنی سوزان است. در بیش از ۸۰ درصد حالت‌ها ستاره از منحنی سوزان عبور می‌کند و نور آن دو بار عدسی می‌شود و به همین دلیل منحنی نوری دو قله دارد. با توجه به نتایج جدول ۴ می‌دانیم که احتمال عبور ستاره از منحنی سوزان ارتباطی با اندازه لکه ندارد.

اهمیت در نظر گرفتن دیگر اختلال‌ها و حتی اختلال‌های کوچک، در راستای تفسیر رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی رویت شده با این نسل جدید تلسکوپ‌ها است.

تلسکوپ‌هایی که قرار است به دنبال رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی باشند دقت بسیار بالاتری دارند. قطعاً چنین تلسکوپ‌هایی می‌توانند اختلال‌های کوچک مربوط به لکه‌های ستاره‌ای را نیز تشخیص بدهند. این مطالعه در جهت بالا بردن

مراجع

1. S Gaudi, *ARAA* **50** (2012) 411.
2. P Sangtarash, Master of Science Thesis, IUT (2019).
3. S Sajadian and S Rahvar, *MNRAS* **452** (2015) 2579.
4. W Bradley Carroll and A Dale Ostriker, "An introduction to Modern Astrophysics", , Person Addison-Wesley, Second edition (2007).
5. S Dodelson "MODERN COSMOLOGY", Elsevier (2003).
6. Ch Han, et al., *MNRAS* **316** (2000) 665.