مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۰، شمارهٔ ۳، پاییز ۱۳۹۹
DOI: 10.47176/ijpr.20.3.71096

اثر تاریکی لبهٔ ستارهٔ چشمه در رصد ریزهمگرایی گرانشی در فیلترهای مختلف

پریسا سنگتراش و صدیقه سجادیان

دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

پست الکترونیکی: sangtarash.p@ph.iut.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۰۵/۰۴ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴)

چکیده

کروی بودن ستاره‌ها باعث می‌شود که شار دریافتی از نقاط مختلف سطح آنها یکنواخت نباشد و در لبه‌ها کمتر از مرکز آن باشد. بدین ترتیب لبه¬ها تاریک‌تر از مرکز ستاره دیده می‌شود که به آن اثر تاریکی لبه می‌گویند. مقدار اثر تاریکی لبه به مشخصات اتمسفری ستاره، دما، گرانش سطحی و فلزیت آن بستگی دارد. در این مقاله، ما یک راهکار برای شناسایی بهتر ستاره‌های چشمه در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی با تقویت نور بالا ارائه می‌کنیم. در این رویدادها که عدسی از مقابل سطح ستارهٔ چشمه عبور می‌کند، وجود تابع تقویت نور ناشی از همگرایی گرانشی که تابعی از مکان است و همچنین نایکنواختی شار دریافتی از نقاط مختلف سطح ستاره به دلیل اثر تاریکی لبه، باعث می‌شود در حین گذر عدسی از سطح ستارهٔ چشمه، رنگ ستاره با زمان تغییر کند. اندازه‌گیری تغییر رنگ در این رویدادها کمک می‌کند تا بتوانیم وابستگی پارامترهای تاریکی لبه به طول موج و در نتیجه پارامترهای اتمسفر ستارهٔ چشمه و پارامترهای خود ستارهٔ چشمه را تعیین کنیم.

واژه‌های کلیدی: ریزهمگرایی گرانشی، اثر تاریکی لبه، اتمسفر ستارهٔ چشمه

۱. مقدمه

ریزهمگرایی گرانشی به خم شدن و تقویت نور یک ستاره به دلیل عبور از میدان گرانشی یک جسم سنگین زمینه که در همان راستای ستارهٔ چشمه قرار گرفته است، اطلاق می‌شود [۱]. رصد این رویداد می‌تواند جهت شناسایی سطح ستاره‌ها مورد استفاده قرار گیرد. ستاره‌های چشمه در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی قابل مشاهده توسط گروه‌های رصدی، درون هستهٔ کهکشان یعنی در فاصلهٔ حدود ۸ کیلو پارسک[۱] نسبت به ما قرار دارند [۲، ۳ و ۴]. در این فاصله همهٔ ستاره‌ها به صورت نقطه‌ای دیده می‌شوند بنابراین احتمال تشخیص اثرات سطحی کوچک برای این ستاره‌ها غیرممکن است. تنها روشی که می‌تواند برای تشخیص و تعیین پارامترهای این اثرات مرتبه دوم کمک کند، ریزهمگرایی گرانشی است [۵ و ۶]. ریزهمگرایی گرانشی به دلیل تقویت نور (ناشی از اثر گرانش برروی مسیر نور) شبیه به ذرّه‌بین، اثرات مرتبه دوم و کوچک را بزرگ می‌کند. از طرف دیگر به دلیل وجود عدسی در یک نقطه از صفحهٔ ستارهٔ چشمه، تقارن کروی سطح ستارهٔ چشمه از بین می‌رود.

۱. Parsec(pc)

شکست تقارن باعث می‌شود اثرات مرتبهٔ دوم متقارن (حتی به طوری که با انتگرال‌گیری بر روی سطح ستارهٔچشمه، این اثرات از بین بروند) در منحنی‌های نوری رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی، اثرات قابل مشاهده‌ای داشته باشند. این اثرات می‌توانند اثر تاریکی لبه، وجود دیسک در اطراف ستاره‌های چشمه، اثر تاریکی گرانشی[۱] و ... باشند. البته شکست تقارن به تنهایی برای مشاهدهٔ آن اثرات مرتبهٔ دوم کافی نیست؛ این که عدسی دقیقاً از نقاطی که این اثرات وجود دارند و یا از محل‌هایی بر روی سطح ستارهٔ چشمه عبور کند که اختلاف را تقویت کند، نیز مهم است. هر دو عامل باعث می شوند که اثرات مرتبهٔ دوم بر روی سطح ستارهٔ چشمه و یا در اطراف آن (حتی اگر این اثرات خودشان تقارن کروی داشته باشند و یا با انتگرال‌گیری از سطح ستارهٔ چشمه صفر شوند) اختلال قابل ملاحظه‌ای در منحنی‌های نوری[۲] رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی ایجاد کنند. البته این اختلال‌ها وقتی قابل ملاحظه می‌شوند که پارامتر برخورد عدسی بسیار کوچک و از مرتبهٔ شعاع ستارهٔ چشمه باشد (به این رویدادها ریزهمگرایی گرانشی با تقویت نور بالا می‌گویند [۷]).

یکی از خواص رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی این است که میزان تقویت نور به طول موج بستگی ندارد زیرا میزان خم شدن نور به طول موج آن وابسته نیست و تنها به جرم عدسی و فاصلهٔ عبور نور تا مرکز جرم عدسی(پارامتر برخورد) بستگی دارد [۸]. تک رنگ بودن در همگرایی گرانشی، یک روش برای تشخیص رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی از دیگر رویدادهای اخترفیزیکی است.

در این مقاله، ابتدا نشان می‌دهیم که اثر تاریکی لبهٔ خاصیت تک‌رنگ بودن نور تقویت شدهٔ ستارهٔ چشمه را از بین می‌برد؛ بعد از آن پیشنهاد می‌کنیم، اندازه‌گیری رنگ ستاره، زمانی که عدسی از سطح ستارهٔ چشمه عبور می‌کند، می‌تواند منجر به تعیین پارامترهای فیزیکی ستارهٔ چشمه و اتمسفر آن شود بنابراین تبهگنی در تعیین پارامترها از بین می‌رود.

۱. Gravity-darkening

۲. Light Curves

۲. اثر تاریکی لبه

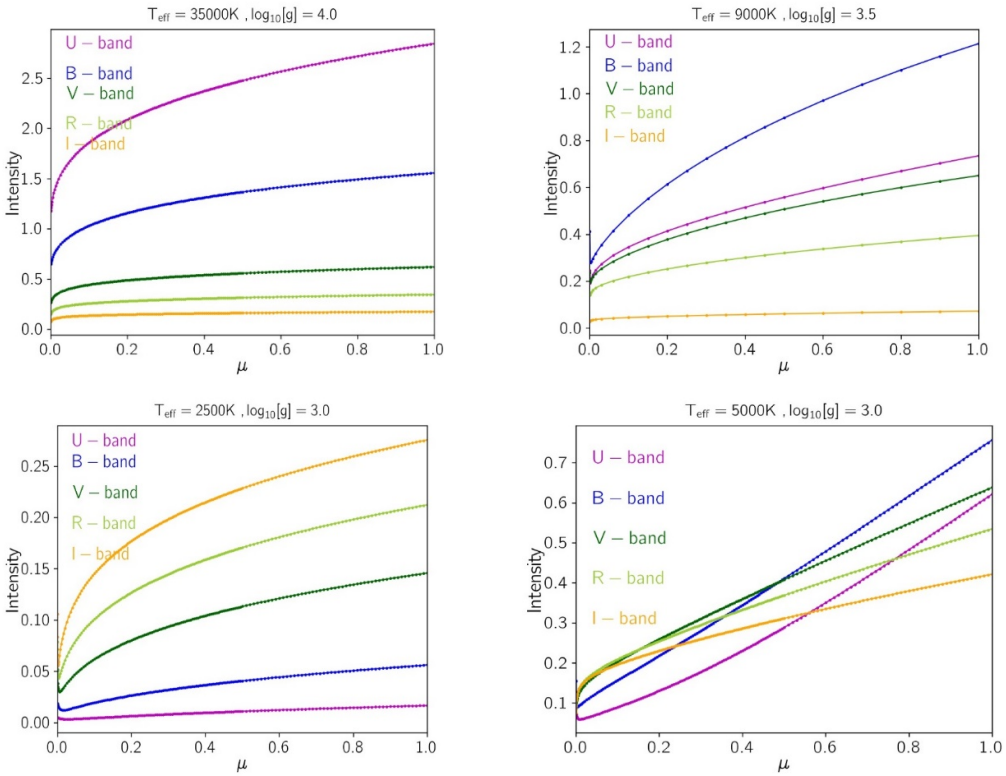
اگرچه ما در آسمان، ستاره‌ها را به صورت یک سطح دایره‌ای درخشان می‌بینیم، اما ستاره‌ها درواقع کروی‌اند و در اطراف همهٔ آنها نیز یک اتمسفر کروی شکل قرار دارد. نور ستاره در حین عبور از اتمسفر ستاره پراکنده می‌شود و میزان پراکندگی آن به عمق اتمسفری که از آن عبور می‌کند، بستگی دارد. نورهایی که از مرکز ستاره به سمت ما می‌آیند از کمینهٔ عمق اتمسفری عبور می‌کنند و نورهایی که از لبه‌های ستاره می‌آیند عمق اتمسفر بیشتری را طی می‌کنند تا به ما برسند. میزان کاهش شدت نور ستاره را می توان با تابع زیر نمایش داد:

$$I = I_{\circ}(1-a(1-\mu)), \qquad (1)$$

در این رابطه a و $I_{\circ}$ دو ثابت هستند. همچنین $\mu = \cos\theta\sqrt{1-\frac{r^2}{R_*^2}}$ است که در آن r فاصلهٔ نقاط روی سطح تصویر شدهٔ ستارهٔ چشمه از مرکز آن است و R_* نیز شعاع ستارهٔ چشمه است. مقدار μ در مرکز ستارهٔ چشمه، عدد یک و در لبه‌ها برابر با عدد صفر است. ضریب ثابت a به پارامترهای ستارهٔ چشمه بستگی دارد. برای مثال تابعی از گرانشی سطحی، دمای سطح ستارهٔ چشمه، فلزیت و نیز طول موج آن است [۹]. برای تعیین دقیق وابستگی این ضریب به پارامترهای مربوطه باید اتمسفر ستاره‌ها را مدل‌سازی کرد و سپس با در نظر گرفتن پراکندگی نور ساطع شده از سطح ستاره به وسیلهٔ اتمسفر ستاره، میزان شدت نور را در آن نقطه تعیین کرد. چنین محاسبات عددی توسط آقای پاتریکس هرینگتون در سال ۲۰۱۷ انجام شده است[۱۰]. از این محاسبات، میزان شار دریافتی از سطح ستارهٔ چشمه در هر طول موج به دست آمده است. با در نظر گرفتن توابع میزان بازدهی فیلترهای استاندارد UBVRI، میزان شار دریافتی از سطح ستارهٔ چشمه برابر است با:

$$I_F = \int_{\circ}^{\infty} K_F(\lambda-\lambda_{\circ})\, d\lambda\, I(\lambda), \qquad (2)$$

که در رابطهٔ بالا $K_F(\lambda-\lambda_{\circ})$ تابع بازده فیلتر F است. فیلتر F می‌تواند هرکدام از فیلترهای U، B، V، R یا I باشد. انتگرال بر



شکل ۱. چهار نمونه از نمودار شار دریافتی از سطح ستاره با در نظر گرفتن دمای سطحی متفاوت بر حسب μ در فیلترهای مختلف.

روی طول موج گرفته می‌شود. در شکل ۱ چهار نمونه از شار دریافتی از سطح چهار نوع ستارهٔ مختلف نشان داده شده است. در این شکل‌ها محور افقی همان μ است و محور عمودی نیز میزان شار را نشان می‌دهد که به مقدار ثابتی بهنجار شده است. مطابق با این شکل‌ها، میزان شار دریافتی از مرکز ستارهٔ چشمه یعنی جایی که $\mu = ۱$ است، بیشینه و مقدار شار دریافتی از لبهٔ ستارهٔ چشمه یعنی جایی که $\mu = ۰$ است، کمینه می‌شود. تابعیت مقدار شار دریافتی به خاصیت ستاره (دما و گرانش سطحی) که در بالای نمودار نوشته شده است بستگی دارد. برای ستاره‌هایی با دمای سطحی متفاوت، مدل اتمسفری که استفاده می‌شود متفاوت است؛ به همین دلیل تابعیت شار سطحی ستاره‌ها با هم متفاوت‌اند.

۳. اثر تاریکی لبه در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی

با در نظر گرفتن تغییرات شار دریافتی از سطح ستارهٔ چشمه بر حسب فاصله تا مرکز ستاره چشمه (شبیه به آنچه در شکل ۱ آمده است)، منحنی‌های نوری رویداد ریزهمگرایی گرانشی در این ستاره‌ها را شبیه‌سازی می‌کنیم. هدف از این شبیه‌سازی این است که تغییرات رنگ ستاره، ناشی از اثر تاریکی لبه در حین تقویت نور بسیار زیاد را بررسی کنیم. دامنهٔ تغییرات رنگی ایجاد شده، تعیین می‌کند که آیا این اثرات اختلال قابل اندازه‌گیری هستند یا خیر.

به منظور محاسبهٔ ضریب تقویت نور با در نظر گرفتن اثرات تاریکی لبه انتگرال زیر باید حساب شود:

$$A_F = \frac{\iint dx\,dy\,A(x,y)\,I_F(r)}{\iint dx\,dy\,I_F(r)}, \qquad (۳)$$

در این رابطه A_F ضریب تقویت نور، $I_F(r)$ شدت نور المانی در فاصلهٔ r از مرکز ستاره و dx و dy المان‌های روی سطح ستاره را مشخص می‌کنند. همان طور که در رابطهٔ بالا دیده می‌شود، ضریب تقویت نور تابعی از فیلتر مورد استفاده است. تغییر ضریب تقویت نور در فیلترهای مختلف، زمانی

قابل ملاحظه خواهد بود که عدسی از سطح ستارهٔ چشمه عبور کند. مقدار ضریب تقویت نور برای هر المان *(A(x,y))* با فرض اینکه فاصلهٔ عدسی تا آن المان بسیار بیشتر از اندازه آن المان است برابر است با:

$$A=\frac{u^{۲}+۲}{u\sqrt{u^{۲}+۴}}, \qquad (۴)$$

که در این رابطه $u=\sqrt{(x-x_L)^{۲}+(y-y_L)^{۲}}$ ، فاصلهٔ المان مورد نظر تا مکان عدسی است(x_L و y_L مکان عدسی را مشخص می‌کنند). توجه شود که اندازهٔ فاصله‌ها به شعاع انیشتین بهنجار شده و در صفحهٔ عدسی نیز تصویر شده است. اگر اندازهٔ المان مورد نظر از مرتبهٔ فاصلهٔ آن تا عدسی باشد، در این صورت باید اثر سطح مقطع محدود[۱] را نیز در نظر بگیریم [۱۱].

در شکل ۲، چهار نمونه منحنی نوری با تقویت نور بالا که در آنها عدسی از سطح ستارهٔ چشمه عبور می‌کند، نشان داده شده است. در قسمت پایین منحنی‌های نوری، میزان تغییر در رنگ ستارهٔ V-I و B-V در واحد قدر نشان داده شده است که همان کمیّت‌های زیر است:

$$\Delta m_{V-I}=-۲/۵\log_{۱۰}\frac{A_V}{A_I}, \qquad (۵)$$

$$\Delta m_{B-V}=-۲/۵\log_{۱۰}\frac{A_B}{A_V}, \qquad (۶)$$

میزان تغییر در رنگ ظاهری ستاره، ناشی از اثر تاریکی لبه تا مقدار ۰/۰۱ در واحد قدر می‌رسد. اندازه‌گیری اثر تاریکی لبه به کمک تغییر در رنگ ستاره، اطلاعات خوبی در مورد اتمسفر ستارهٔ چشمه به ما می‌دهد. توجه می‌کنیم که در مدل‌سازی اتمسفر ستاره‌ها، پارامترهای زیادی وجود دارد بنابراین تعیین همهٔ پارامترها به صورت یکتا امکان‌پذیر نیست ولی می‌تواند به کمک اندازه‌گیری‌های دیگر مثلاً رصد طیف‌سنجی و یا قطبش‌سنجی همهٔ پارامترها را با دقّت زیاد تعیین کرد.

با توجه به شکل ۲، بیشترین تغییر در رنگ ستاره زمانی رخ می دهد که فاصلهٔ عدسی تا ستارهٔ چشمه به کمترین مقدار برسد (در پیک منحنی نوری). البته دو پیک دیگر در تغییر رنگ ستاره، زمانی که عدسی وارد سطح ستاره چشمه می‌شود و زمانی که از آن خارج می‌شود، رخ می دهند. تغییرات در رنگ ستارهٔ V-I شدیدتر از تغییرات در رنگ ستارهٔ B-V است. تغییرات در رنگ ستاره، در حین تقویت نور برای ستاره‌هایی با دمای سطحی کم (کمتر از ۱۰۰۰۰ کلوین) به مقدار ۰/۰۱ در واحد قدر می‌رسد.

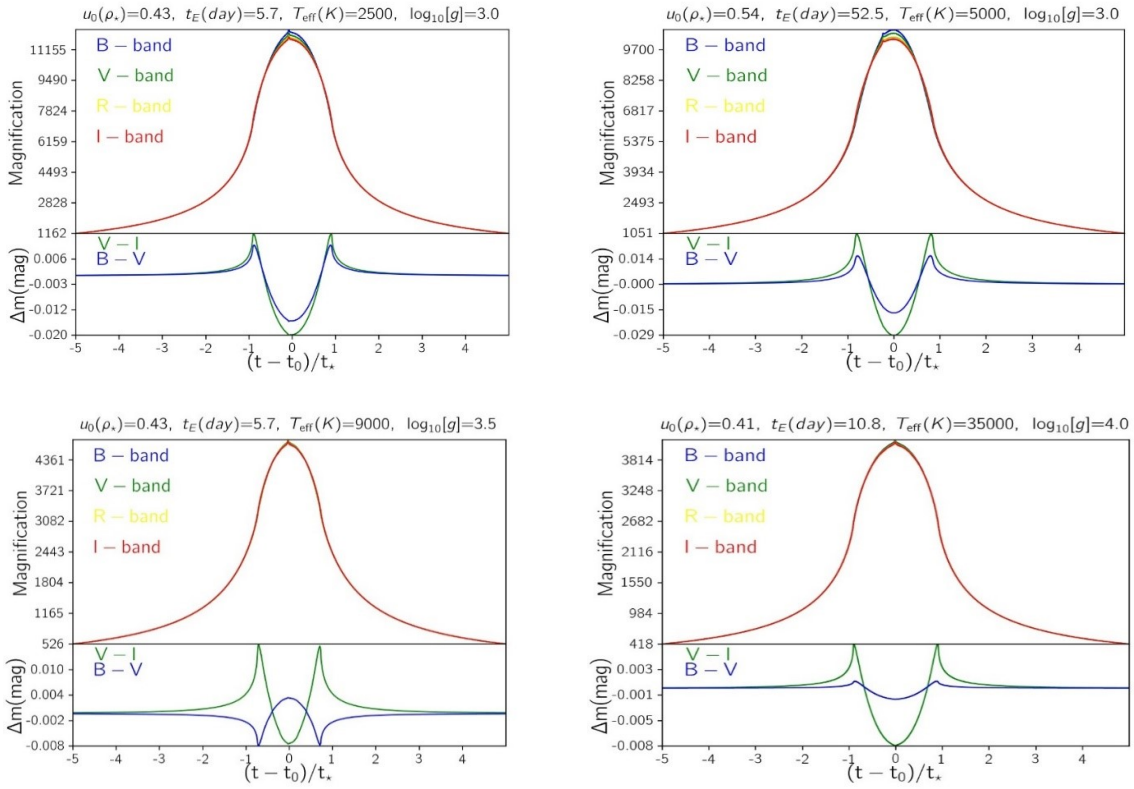
۴. بحث بر روی جنبه های رصدی

در راستای انجام رصد از چنین تغییرات در رنگ ستاره‌ها در حین تقویت نورشان، به کمک تلسکوپ‌های امروزه دو نکته (محدودیت) وجود دارد که مانع از انجام چنین رصدی به کمک این تلسکوپ‌ها می‌شود. این دو نکته در زیر توضیح داده شده‌اند.

نکتهٔ اول: امروزه دررصدهای واقعی رویدادهای ریز همگرایی گرانشی در دو فیلتر اندازه‌گیری انجام می‌شود. زیرا مشخصهٔ رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی این است که میزان تقویت نور آن در فیلترهای مختلف یکسان است. اندازه‌گیری ضریب تقویت نور در دو فیلتر تنها برای تشخیص رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی از دیگر رویدادهای اخترفیزیکی (برای مثال تغییرات ذاتی، سوسو زدن ستاره‌ها و ...) است. البته در رصدها اصولاً اکثر داده‌ها در یک فیلتر اندازه گرفته می‌شود و در فیلتر دوم تعداد داده‌ها بسیار کمتر است. برای مثال ماهواره‌ی رومان[۲] در رصد رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی به‌کمک فیلتر W۱۴۹ در هر ۱۵ دقیقه یک داده ثبت خواهد کرد، در حالی‌که با فیلتر Z۰۸۷ در هر ۱۲ ساعت یک داده ثبت خواهد کرد [۱۲]. چنین داده‌های پراکنده‌ای مناسب برای مشاهدهٔ این اثرات ناشی از تاریکی لبه در ستاره‌ها نیست. در رصدها برای به حداکثر رساندن تعداد داده‌های رصدی و بیشینهٔ استفاده از شار تقویت شدهٔ ستارهٔ چشمه (جهت کاهش نویز و بالا بردن سیگنال ستاره) اکثر داده‌ها در یک فیلتر ثابت گرفته می‌شود. بنابراین، اندازه‌گیری اثر تاریکی لبه به کمک تغییر رنگ ستاره در حین تقویت نور آن به کمک رصدهای امروزه

۱. Finite Size Effect

۲. Roman Space Telescope (RST)



شکل ۲. چهار نمونه منحنی نوری رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی با تقویت نور بالا که در همهٔ آنها برای ستارهٔ چشمه اثر سطح مقطع محدود نیز در نظر گرفته شده است. منحنی‌های نوری در فیلترهای مختلف با رنگ‌های مختلف نشان داده شده است. پارامترهای ستارهٔ چشمه در هر مورد در بالای منحنی نوری آورده شده است. مقدار باقی‌مانده که در پایین منحنی نوری نشان داده شده است، تغییر در رنگ ظاهری ستاره چشمه (در واحد قدر) در هنگام گذر عدسی از روی سطح ستارهٔچشمه است.

امکان‌پذیر نیست، مگر این که راهبرد رصدی تغییر کند و در دو فیلتر به تعداد مساوی دادهٔ رصدی ثبت شود.

نکتهٔ دوم: برای رصد چنین تغییراتی در رنگ ستاره‌های در حین تقویت نور، بایدرنگ ستاره که همان اختلاف قدر ظاهری ستاره در دو فیلتر متفاوت است، با فاصلهٔ زمانی بسیار کوتاه اندازه گرفته شود. فاصله بین داده‌های رصدی نیز به زمان مشخصه در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی با تقویت نور بالا (زمان لازم برای اینکه عدسی مسافتی به اندازه شعاع ستاره چشمه را طی کند) بستگی دارد یعنی:

$$t_* = t_E\ \rho_* \cong ۲۰\ \text{days} \times ۰/۰۱ = ۴/۸\ \text{hrs}, \qquad (۷)$$

که در بالا مقدار آن برای یک ستاره غول در یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی نوعی حساب شده است. برای اندازه‌گیری تغییرات رنگ ستاره، در مدت حدود ۵ ساعت اگر هر ۱۰ دقیقه یک داده ثبت شود، در این صورت کل تعداد داده ها حدود ۳۰ می‌شود. این تعداد برای اندازه‌گیری تغییرات رنگ کافی است. در حال حاضر فاصلهٔ بین داده‌های رصدی در رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی ۵ دقیقه نیست بلکه بیشتر است.

لازم به ذکر است که دقت فوتومتری تلسکوپ‌هایی که امروزه رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی را رصد می‌کنند حدود ۰/۰۱ قدر است. البته نسل بعدی تلسکوپ‌ها مسلماً دقت بالاتری خواهند داشت و با فاصلهٔ زمانی کوتاه‌تری داده‌های رصدی را ثبت خواهند کرد.

۵. نتایج

در این مقاله یک راهکار برای حل مشکل تبهگنی در رصد رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی در تعیین پارامترهای ستارهٔ چشمه ارائه شده است. ما پیشنهاد می‌کنیم که رنگ ستاره‌ها با دقّت زیاد در زمانی که اثر تقویت نور بسیار بالا است و عدسی از سطح ستارهٔ چشمه عبور می‌کند، اندازه گرفته شود. اگر رنگ ستاره با زمان تغییر کرد، این تغییر رنگ می‌تواند علّت‌های مختلفی داشته باشد که یکی از این علّت‌ها، اثر تاریکی لبه در ستاره‌ها است. اثر تاریکی لبه در ستاره‌های غول قرمز بسیار بیشتر است. این ستاره‌ها حدود ۳۰ درصد چشمه‌های رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی به سمت مرکز کهکشان را تشکیل می‌دهند. ما در این مقاله با استفاده از مدل تاریکی لبه به دست آمده بر اساس شبیه‌سازی‌های اتمسفر ستاره‌ها، رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی آنها را با فرض این که عدسی از سطح ستارهٔ چشمه عبور کند، شبیه‌سازی کرده‌ایم. برای ستاره‌هایی که دمای سطحی آنها بسیار کم است، مدل اتمسفری *MARCS* استفاده می‌شود [۱۳]. بر اساس این مدل اثر تغییر رنگ در زمانی که عدسی در هنگام وارد شدن به سطح ستارهٔ چشمه است به بیشینه می‌رسد. همچنین مقدار پیک در منحنی نوری نیز تغییر می‌کند. در این صورت مقدار پارامتر برخورد به فیلتر مورد استفاده بستگی خواهد داشت. برای ستاره‌هایی که دمای سطحی آنها بیش از ۸۰۰۰ درجهٔ کلوین است، از مدل اتمسفری *TLUSTY* استفاده شده است [۱۴]. در ستاره‌های خیلی داغ تغییر در شار دریافتی از سطح ستاره در طول موج‌های کوتاه‌تر بیشتر است (شکل ۲ را ببینید). به همین دلیل اثر تغییر رنگ ستاره در B-V بزرگ‌تر است.

مراجع

1. B aczynski, *ApJ*. **301** (1986) 503.
2. I Soszynski, A Udalski, M K Szymanski, and et al., *AcA*. **60** (2010) 165.
3. I A Bond, F Abe, R J Dodd, and et al., *MNRAS* **327** (2001) 868.
4. S L Kim, C U Lee, B Park, and et al., *JKAS* **49** (2016) 37.
5. S Rahvar, *International Journal of Modern Physics D* **24** (2015) 1530020.
6. B S Gaudi, *ARA&A* **50** (2012) 411.
7. G Kim and N Safizadeh, *ApJ.* **500** (1998) 37.
8. M Dominik, *Gen Relativ Gravit* **43** (2011) 989.
9. D Hestroffer and C Magnan, *A&A* **333** (1998) 338.
10. J P Harrington, *Ap&SS* **8** (1970) 227.
11. H J Witt, S Mao, *ApJ*. **430** (1994) 505.
12. M Penney, B S Gaudi, E Kerins, and et al., *ApJS* **241 (2019)** 3.
13. B Gustafsson, B Edvardsson, K Eriksson, and et al., *A&A*, **486** (2008) 951.
14. T Lanz and I Hubeny, *ApJS* **146** (2003) 417.