مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۱۹، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۸

مروری بر نحوهٔ پردازش تصاویر نجومی یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی

صدیقه سجادیان، بنفشه آدمی و محمدرضا محمدی

دانشکدهٔ فیزیک، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان

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

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۴ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۸/۰۷/۰۲)

چکیده

در حال حاضر در علم نجوم و اخترفیزیک یکی از مهم‌ترین مراحل پژوهش انجام داده‌کاهی است. داده‌کاهی به کل فرایندهایی گفته می‌شود، که تصاویر خام نجومی را به رویدادهای اخترفیزیکی تبدیل می‌کند. این فرایندها برای رویدادهای مختلف اندکی متفاوت‌اند، ولی همگی بر یک اساس هستند. در این مقاله سعی داریم، مراحل انجام داده‌کاهی تصاویر گرفته شده از یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی را به تفصیل بیان کنیم. این مقاله به منظور یادگیری و انجام داده‌کاهی برای هر رویداد اخترفیزیکی که در آن نور یک ستاره با زمان تغییر می‌کند، بسیار مناسب است. فرایند داده‌کاهی رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی شامل ۷ مرحله است. در طی این مراحل در ابتدا تصاویر درجه‌بندی می‌شوند. سپس برخی از تصاویر درجه‌بندی شده انتخاب می‌شوند، تا یک تصویر مرجع ساخته شود. تصویر مرجع جهت مقایسه کردن تمامی تصاویر گرفته شده به منظور تعیین میزان تغییر در نور ستارهٔ چشمه مورد نظر استفاده می‌شود. برای این منظور ابتدا تمامی تصاویر گرفته شده به کمک روش‌های دقیقی با تصویر مرجع منطبق می‌شوند. تصاویر از نظر یکی بودن فاکتور مقیاس بررسی می‌شوند و همگی به یک فاکتور مقیاس تبدیل می‌شوند. در این مرحله می‌توان با اطمینان تصاویر هم مقیاس شده را از هم کم کرد و میزان تغییر در نور ستارهٔ چشمه مورد نظر را تعیین کرد.

واژه‌های کلیدی: پردازش داده‌های نجومی، رویدادهای ریزهمگرایی گرانشی

۱. مقدمه

در یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی، در اثر گرانش نور، یک ستارهٔ دور دست با زمان تغییر می‌کند [۱]. این رویدادها را می‌توان با رصد پیوسته از هستهٔ کهکشان که در آن چگالی تعداد ستاره‌ها زیاد است، مشاهده کرد. ریزهمگرایی گرانشی یک روش برای آشکارسازی سیارات فراخورشیدی است [۲]. در این رویدادها اثر گرانشی سیاره بر روی مسیرحرکت نور یک ستارهٔ دوردست باعث ایجاد یک اختلال بسیار کوچک در منحنی نوری ستارهٔ چشمه می‌شود. اگر بخواهیم سیگنال‌های بسیار کوچک ناشی از سیّارات سبک را با اطمینان کافی تشخیص دهیم، باید فرایند داده‌کاهی را با دقت بسیار زیاد انجام دهیم.

فرایند داده‌کاهی، تبدیل تصاویر خام نجومی به یک رویداد اخترفیزیکی، ۶ مرحله اصلی دارد. هر مرحله تعدادی پارامتر دارد که باید با توجه به مشخصات ستارهٔ چشمه و میدان دیدی که ستارهٔ چشمه در آن قرار دارد، تعیین شود. از جمله

پارامترهای بسیار مهم در این راستا، میزان آمیختـه شـدن نـور ستارهٔ چشمه با نورستاره‌های مجاورش است، که آن را بـا یـک پارامتر بـه نـام پـارامترآمیختگی نشـان مـی‌دهیم. در ایـن مقالـه مروری، سعی داریم که تمامی این عامل‌ها را بیان کرده و تعیین کنیم در فرایند داده‌کاهی برای یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی با یک ستارهٔ چشمهٔ مشخص، پارامتر مهم داده‌کـاهی را چگونـه تعییر دهیم تا نتایج داده‌کاهی به اندازهٔ کافی قابل اعتماد باشـند. در بخش‌های زیر به ترتیب مراحل انجام داده‌کاهی نجومی یـک رویداد ریزهمگرایی گرانشی را به تفصیل شرح می‌دهیم. در هر مرحله تعیین می‌کنیم چه پارامترهایی وجود دارد و چگونه برای هر رویداد جداگانه مقدار مناسب آن پارامتر را قرار دهیم.

کد مربوط به داده‌کاهی تصـاویر نجـومی کـه در ایـن مقالـه مرور شده اسـت، توسـط دانیـل بـرامیچ نوشـته شـده اسـت و DanIDL[1] نامیده شده است. این کد به زبان IDL نوشـته شـده است [۳]. در هر مرحله یک فایل پارامتر وجـود دارد کـه بایـد قبل از اجرای هر مرحلهٔ این پارامترها بـا توجـه بـه ملاحظـات مربوط به ستارهٔ چشمه و میدان دیدی که سـتارهٔ چشـمه در آن است تعیین شود.

۲. درجه‌بندی کردن تصایر

قبل از انجام هر کاری در فرایند داده‌کـاهی ابتـدا بایـد تصـاویر گرفته شده را همانند کنیم. به ایـن معنـی کـه انـدازهٔ تصـاویر و میزان زمان نورگیری، را بـرای همـه تصـاویر یکسـان مـی‌کنیم. تمامی تصاویر باید به زمان نورگیری مربوطه‌شان تقسیم شـوند، تا بتوان میزان تغییر در درخشندگی یک ستاره را درست تعیـین کرد. زمـان نـورگیری بـرای تصـاویر مختلـف گرفتـه شـده در شب‌های مختلف با توجه بـه وضـعیت آب و هـوایی متفـاوت است. در یک شب ممکن است سرعت باد بسیار بالا باشد و در یک شب دیگر ممکن است، ابر در آسمان وجود داشته باشد. بر این اساس افرادی که رصد مـی‌کننـد گـاهی زمـان نـورگیری را تغییر می‌دهند. میزان زمان نورگیری بـرای هـر تصـویر در یـک سری فایل‌هایی به نام سرفصل[2] ذخیره می‌شود. تصاویر نجـومی و سرفصل تصاویر به کمک نرم‌افزار ds9 قابل مشاهده و بررسی است. نمونه‌ای از یک تصویر نجومی در شکل ۱ آمده است.

اندازهٔ تصاویر نیز ممکن است متفاوت باشد. چنانچه در یک شب تغییرات نور ستارهٔ چشمه مورد نظـر بسـیار سـریع باشـد، رصدگر می‌تواند از تمامی سی‌سی‌دی[3] استفاده نکند تـا سـرعت خواندن تصاویر بالا رود و بتوانـد تعـداد بیشـتری دادهٔ نجـومی ثبت کند. قبل از مقایسهٔ تصـاویر مختلـف گرفتـه شـده از یـک رویداد ریزهمگرایی گرانشی، باید همه تصاویر بـه یـک انـدازهٔ مشخص برده شوند.

در فرایند داده‌کاهی می‌توان در این مرحله تعیین کرد از چـه بخشی از سی‌سی‌دی استفاده شود. برای مثال اگر کمبـود وقـت داریم و یا لبه‌های تصاویر خراب شده باشند، اندازهٔ مـورد نیـاز تصاویر را در این مرحله از مقدار واقعی کمتر در نظر می‌گیریم.

تمامی تصاویر باید برحسب یک زمان یکتـا مرتـب شـوند. برای این منظور از زمان جهانی استفاده می‌شود. ترتیـب زمـانی تصاویر برای رویدادهای متغیر بازمان که با چندین تلسکوپ در مکان‌های مختلف بر روی کُرهٔ زمین رصـد شـده اسـت، بسـیار مهم است. زمان مبنـا بـرای رویـدادهای ریزهمگرایـی گرانشـی HJD[4] است.

در نهایت، در تصاویر مختلـف نوفـه‌های مشـترک بـین همـه تصاویر را کـم مـی‌کنیم. ایـن نوفـه‌ها عبارتنـد از نوفـهٔ ناشـی از جریان‌های گرمایی و نیز نوفهٔ ناشی از جریان‌هـای الکتریکـی کـه در هنگام تخلیهٔ سی‌سی‌دی به جای مانده است. نوفهٔ جریان‌هـای گرمایی به‌راحتی با کاهش دمای سی‌سی‌دی قابـل حـذف اسـت. نوفهٔ ناشی از جریان‌های الکتریکی بـاقی‌مانـده هـر شـب قبـل از شروع رصد با گرفتن تصاویری (هنگامی که هنوز دوربین شـروع به کار نکرده اسـت) قابـل انـدازه‌گیری اسـت. ایـن تصـاویر کـه تصاویر سوییده[5] نامیده می‌شوند، باید از تمامی تصـاویری کـه در طول آن شب گرفته می‌شوند، کم شوند تا این اثـر حـذف شـود.

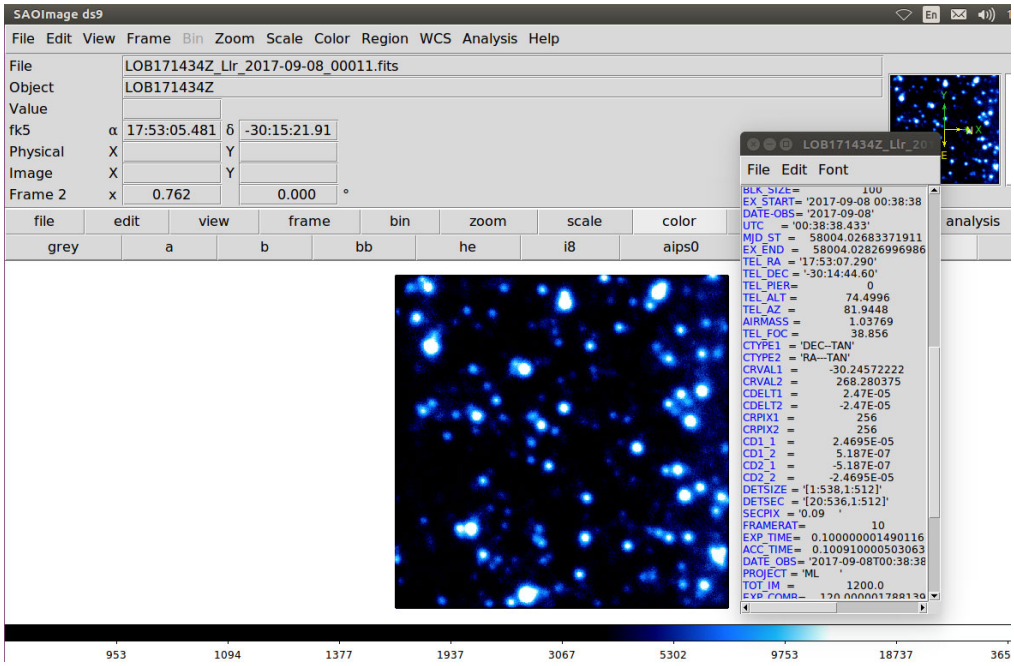
۱. http://www.danidl.co.uk/

۲. Header

۳. CCD (Charged Coupled Divise)

۴. Heliocenteric Joulian date

۵. Bias images



شکل ۱. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) نمونه‌ای از یک تصویر نجومی که به کمک نرم‌افزار ds9 باز شده است. فایل سر فصل که حاوی تمامی مشخصات تصویر است نیز در سمت راست آمده است. این تصویر به کمک تلسکوپ ۱٫۵ متری دانمارک و به وسیلهٔ دوربین تصویر برداری شانسی گرفته شده است.

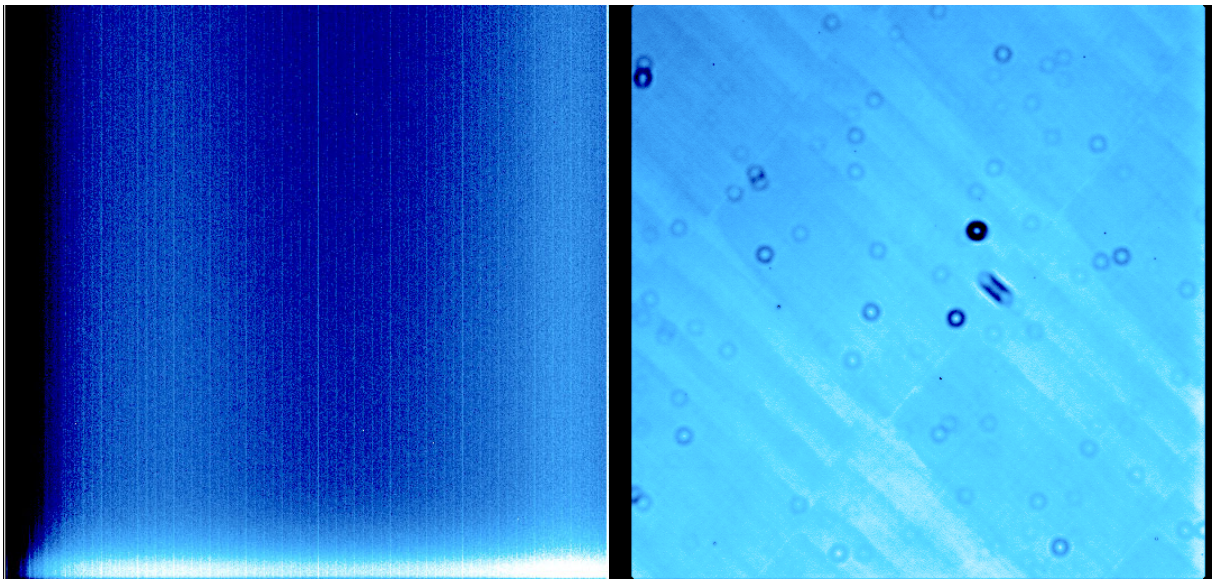
به دلیل برخی نقیصه‌ها، سی‌سی‌دیِ تلسکوپ‌ها آن طور که ما انتظار داریم کار نمی‌کنند و برخی از پیکسل‌های آن ممکن است با برخورد یک فوتون ورودی یک الکترون آزاد نشود. بنابراین میزان بازده برای هر پیکسل متفاوت است. برای تعیین این بازده و کارایی هر پیکسل از سی‌سی‌دی زمانی که هنوز آسمان به طور کامل تاریک نشده است ولی خورشید زیر افق است، از یک ناحیهٔ هموار آسمان بدون هرگونه ستارهٔ روشن درون میدان دیدِ مربوطه چندین تصویر گرفته می‌شود. این تصاویر با هم ترکیب می‌شود و یک تصویر دیگر درست می‌کنند که به آن تصویر هموار[۱] گفته می‌شود. به منظور درجه‌بندی کردن تصاویر و حذف این اثر، تمامی تصاویر گرفته شده در طول شب بعد از کم شدن از تصویر بایاس باید بر تصویر هموار نیز تقسیم شوند، تا میزان واقعی نور فرودی به هر پیکسل به دست آید. به کل این مراحل درجه‌بندی کردن تصاویر می‌گویند. نقاط تاریک در تصویر هموار نشان دهندهٔ عملکرد نامناسب پیکسل سی‌سی‌دی است. در شکل ۲ نمونه‌ای از یک تصویر هموار (سمت راست) و نمونه‌ای از یک تصویر بایاس (سمت چپ) نمایش داده شده است.

۳. ساختن تصویر مرجع

در این مرحله باید از تمامی تصاویر گرفته شده یک تصویر مرجع بسازیم. تصویر مرجع تصویری است که کیفیت آن بسیار بالا است و برای مقایسهٔ تصاویر با هم استفاده می‌شود. در واقع اگر بخواهیم میزان تغییرات در شار دریافتی یک ستارهٔ چشمه را بررسی کنیم، لازم است تمامی تصاویر با یک تصویر مرجع مقایسه شوند. برای مقایسهٔ تصاویر به منظور یافتن بهترین‌ها سه عامل در نظر گرفته می‌شود: الف) میزان پهنای تابع توزیع درخشندگی ستارهٔ چشمه[۲]، ب) میزان نوفهٔ پس زمینهٔ تصویر و ج) تعداد ستاره‌های تشخیص داده شده در هر تصویر. عامل اوّل بسیار مهم است، زیرا نشان دهندهٔ میزان تلاطم در اتمسفر زمین است. هر چه تابع توزیع درخشندگی ستارهٔ چشمه بر روی سی‌سی‌دی از حد پراش تفاوت داشته باشد، مقدار

۱. Flat images

۲. Full Width at Half Maximum (FWHM)



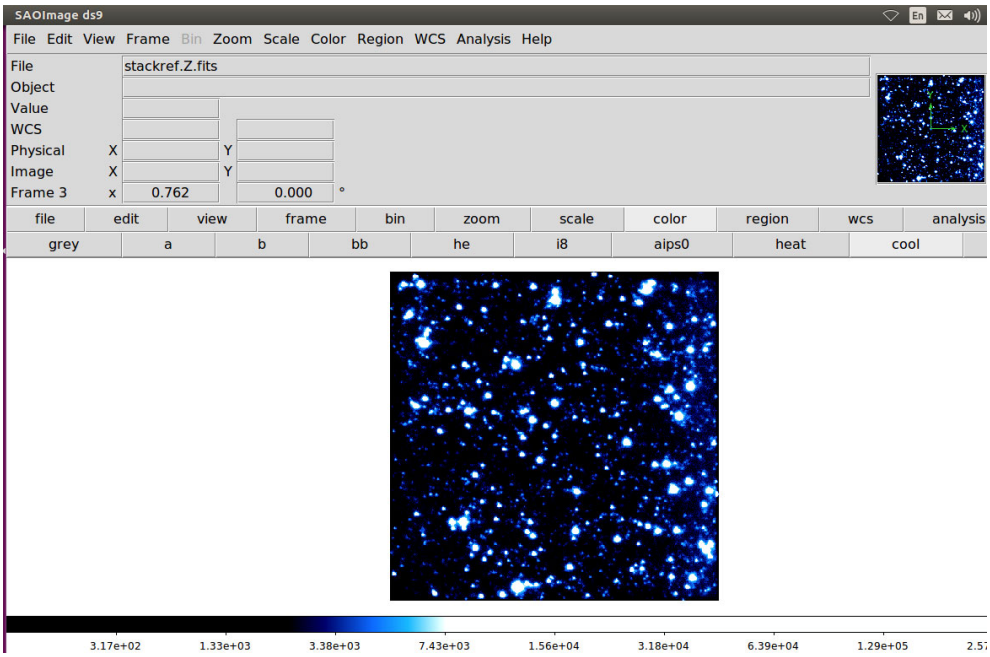
شکل ۲. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) تصویر سمت راست یک نمونه از یک تصویر هموار و تصویر سمت چپ یک نمونه از یک تصویر سوییده که به وسیلهٔ تلسکوپ دانمارک گرفته شده‌اند، را نشان می‌دهند.

تلاطم در جو زمین بیشتر بوده است. میزان تلاطم در جو زمین را با پارامتر دید نشان می‌دهند که $seeing \propto \frac{\lambda}{r_0}$. در این رابطه λ طول موج رصد و r_0 طول همدوس است. طول همدوس فاصلهٔ بین دو نقطه بر روی جبههٔ موج است که جذر میانگین مربعی اختلاف فازهای بین نقاط مختلف در آن طول به یک رادیان برسد. خود طول همدوس تابعی از طول موج است و با افزایش طول موج به صورت $r_0 \propto \lambda^{6/5}$ افزایش می‌یابد. پراش نور نیز به دلیل عبور جبههٔ موج تخت مربوط به یک ستارهٔ دوردست از دهانهٔ تلسکوپ رخ می‌دهد. در اثر پراش یک ستارهٔ دوردست به صورت یک دایره با شعاع $\theta = 1.22\frac{\lambda}{D}$ دیده می شود، که در این رابطه D قطر دهانهٔ تلسکوپ است.

میزان نوفهٔ پس‌زمینه به فاز ماه در شب رصد بستگی دارد. وقتی ماه کامل است میزان نوفهٔ پس زمینه به شدت بالا می‌رود و تصاویر کیفیت خوبی نخواهند داشت. تعداد ستاره‌های هر تصویر در مرحله اول یعنی درجه‌بندی کردن تصاویر، تشخیص داده می‌شود. هر چه تعداد ستارهٔ بیشتری در تصویر تشخیص داده شود، به این معنی است که اثرات بدی آب و هوا شامل وزش باد شدید و یا وجود ابر یا مه در تصاویر کمتر است.

در انتخاب تصاویر خوب حتی‌المکان باید تصاویر مربوط به یک شب و یا چند شب پشت سرهم انتخاب شوند؛ زیرا قرار است همهٔ تصاویر از تصویر مرجع کم شوند و تغییرات درخشندگی یک ستاره بررسی شود. بنابراین بهتر است تصویر مرجع مربوط به یک زمان خاص و یا بازهٔ زمانی کوتاه باشد.

این که چند تا تصویر با هم ترکیب شوند تا تصویر مرجع ساخته شود به مشخصات ستارهٔ چشمه و میدان دیدی که ستارهٔ چشمه در آن است، بستگی دارد. اگر ۱) درون میدان دید یک یا چند ستاره بسیار روشن (به طوری که سی‌سی‌دی در مکان آنها اشباع شده باشد) در فاصله‌ای نسبتاً نزدیک به ستارهٔ چشمه باشد و یا ۲) خود ستارهٔ چشمه بسیار پرنور باشد و ۳) یا در نزدیکی ستارهٔ چشمه چندین ستاره وجود داشته باشد، زمان نورگیری را آنقدر کوتاه انتخاب می‌کنیم که ستارهٔ چشمه در تصویر مرجع قابل تشخیص باشد. در غیر این صورت می‌توان زمان نورگیری را با انتخاب تعداد بیشتری تصویر جهت ساختن تصویر مرجع بالا برد. البته زمان نورگیری بالاتر در برخی مواقع نوفه را زیاد افزایش می‌دهد. این که نوفه چگونه با افزایش زمان نورگیری تغییر می‌کند از مشخصات تصویر مرجع قابل استنباط است. نمونه‌ای از تصویر مرجع درست شده از همان میدان



شکل ۳. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) تصویر مرجع از میدان دید تصویر شکل ۱. دقّت در این تصویر بسیار بیشتر از تصویر شکل ۱ است.

دیدی که تصویر نشان داده شده در شکل ۱ از آن گرفته شده است، در شکل ۳ آمده است. همان طور که دیده می شود دقّت در تصویر مرجع بسیار بیشتر از تصویر شکل ۱ است.

۳. ۱. تصویر برداری شانسی

یک روش برای کاهش اثر تلاطمِ جو زمین بر روی تصاویرگرفته شده به‌کمک تلسکوپ‌های زمینی استفاده از دوربین تصویر برداری‌شانسی است [۴]، در روش تصویر برداری شانسی، برای گرفتن یک تصویر ابتدا تعداد زیادی تصویر با زمان نورگیری بسیار کوتاه گرفته می‌شود و سپس تصاویر خوب انتخاب شده و با هم طوری ترکیب می‌شوند که زمان نورگیری هر کدام حدود ۱۰–۱۲ ثانیه باشد. به این تصاویر کیوب[۱] می‌گویند. ترکیب هر ۱۰ کیوب یک تصویر واقعی را می‌سازد. تصویر مرجع از ترکیب کردن تصاویر کیوب که کیفیت خیلی خوب دارند به دست می‌آید و نه از ترکیب تصاویر نهایی.

۴. یافتن ستاره‌های درون تصویر مرجع

در مرحلهٔ بعد مکان و شار تمامی ستاره‌های درون تصویر مرجع، ثبت می‌شوند. یکی از این ستاره‌ها، ستارهٔ چشمه است که می‌خواهیم میزان تغییرات نور آن را برحسب زمان تعیین کنیم. مکان و شار بقیهٔ ستاره‌های درون میدان دید نیز جهت منطبق کردن تمامی تصاویر بر روی تصویر مرجع لازم است.

به منظور تعیین مکان و شار ستارهٔ چشمه، در ابتدا به هر نقطه از تصویر که از پس‌زمینه روشن‌تر باشد یک تابع نقطه گستر[۲] مربوط به یک ستاره برازش می‌شود. تابع نقطه گستر تابعی است که نشان دهندهٔ میزان و نحوهٔ پخش درخشندگی ستارهٔ چشمه بر روی سی‌سی‌دیِ تلسکوپ است. نحوهٔ پخش درخشندگی بر روی مساحت تابع نقطه‌گستر را می‌توان ثابت و یا متغیّر با مکان در نظر گرفت [۵]. یکی از مهم‌ترین پارامترها در این مرحله اندازهٔ تابع نقطه گستر است که می‌خواهیم بر روی هر ستاره برازش کنیم. این اندازه باید بر حسب پهنای نصف قلّهٔ درخشندگی ستارهٔ چشمه تعیین شود. برای تعیین بهینهٔ این پارامتر باید ابتدا مکان ستارهٔ چشمه را تعیین کرد و سپس تعداد ستاره‌هایی که نورشان وارد تابع نقطه گستر ستارهٔ چشمه می‌شوند را با اجرای چندین بار مرحلهٔ ۳ داده‌کاهی (با در نظر گرفتن اندازهٔ تابع نقطه گسترهای مختلف) تعیین کرد.

۱. Cube

۲. PSF (Point Spread Function)

اگر تعداد ستاره‌های آمیخته شده با ستارهٔ چشمه با اندازهٔ تابع نقطه گستر زیاد تغییر نکند، اندازهٔ تابع نقطه گستر را می‌توانیم حدود ۱۱– ۱۲ برابر پهنای نصف قلهٔ درخشندگی ستارهٔ چشمه در نظر بگیریم. چنانچه ستارهٔ نسبتاً روشنی در نزدیکی ستارهٔ چشمه است، به طوری که با افزایش تابع نقطه‌گستر میزان آمیخته شدن نور این ستاره با ستارهٔ چشمه افزایش می‌یابد، اندازهٔ تابع نقطه گستر را کوچک در نظر می‌گیریم.

اندازه تابع نقطه گستر حتی با وجود ستاره‌های آمیخته شده بسیار در نزدیکی ستارهٔ چشمه را نمی‌توان خیلی کوچک در نظر گرفت؛ زیرا در این صورت مقداری از درخشندگی ستارهٔ چشمه را از دست می‌دهیم.

بعد از اجرایی این مرحله ستاره‌های موجود در میدان دید بر حسب میزان درخشندگی‌شان درون یک فایل ذخیره می‌شوند.

۵. منطبق کردن تصاویر بر روی تصویر مرجع

در این مرحله تمامی تصاویر واقعی بر تصویر مرجع منطبق می‌شوند. در روش مثلثی مکان سه ستارهٔ روشن درون هر کدام از تصاویر و نیز تصویر مرجع تعیین می‌شوند. سپس به کمک یک تبدیل مختصات با در نظر گرفتن ۶ پارامتر (سه تا انتقال و سه تا چرخش) این سه ستاره بر روی ستاره‌های متناظر درون تصویر مرجع منطبق می‌شوند. این عمل برای هر سه ستارهٔ روشن درون میدان دید تکرار می‌شود و در نهایت بر روی پارامترهای انتقال و چرخش به دست آمده، متوسط گرفته می‌شود.

آنچه در این مرحله مهم است، کمینهٔ فاصلهٔ بین ستاره‌های روشنی است که در نظر می‌گیریم تا به کمک روش مثلثی میزان چرخش و یا انتقال را پیدا کنیم. این فاصله را که باید بر حسب تعداد پیکسل بیان شود نمی‌توان از حدود ۱۰۰ پیکسل کمتر در نظر گرفت. به عبارتی روش مثلثی برای ستاره‌های نزدیک به هم مناسب نیست. این که مقدار این عدد را چقدر نظر بگیریم، به تعداد ستاره‌های تشخیص داده شده در میدان دید از مرحلهٔ قبل بستگی دارد. چنانچه تعداد ستاره‌ها زیاد باشد، به عبارتی میدان مورد نظر شلوغ باشد، این فاصله را کمترین مقدار یعنی ۱۰۰ پیکسل در نظر می‌گیریم. اگر میدانِ دید مورد نظر تقریباً خالی باشد این فاصله را می‌توان افزایش داد و حدود ۱۱۰ و یا ۱۲۰ پیکسل در نظر گرفت.

پارامتر مهم دیگر در این مرحلهٔ میزان عامل مقیاس تصاویر در حین مقایسهٔ آنها با تصویر مرجع است. عامل مقیاس نشان دهندهٔ این است که تصاویر نسبت به تصویر مرجع به دلیل وجود باد، ابر، مه و یا کم‌سویی دقّت کمتری دارند. این عوامل باعث می‌شوند که درون تصویر هر ستاره بزرگ‌تر دیده شود که از دید ما تصویر مورد نظر عامل مقیاس بزرگ‌تری نسبت به تصویر مرجع دارد. در این مرحله نمی‌توان میزان عامل مقیاس برای هر تصویر را با روش مثلثی تشخیص داد. بنابراین کمینه محدوده برای این عامل را در این مرحله در نظر می‌گیریم، برای مثال حدود ۰٫۹۹ تا ۱٫۰۱. البته اگر کیفیت تصاویر گرفته شده پایین باشد، نمی‌توان این محدوده را برای عامل مقیاس در نظر گرفت؛ زیرا این محدوده باعث حذف شدن تعداد زیادی تصویر می‌شود.

۶. تشخیص عمل مقیاس تصاویر

در مرحلهٔ بعد باید این تصاویر از تصویر مرجع کم شوند، تا میزان تغییر در شار ستارهٔ چشمه را تعیین کنیم. از آنجایی که ممکن است در اثر تغییرات جوی و یا کم سویی مقیاس تصاویر نسبت به تصویر مرجع تغییر کند، این کم کردن به روش ساده پیکسل به پیکسل انجام نمی‌شوند. ابتدا سعی می‌کنیم به کمک یک تابع کرنل و در نظر گرفتن یک پس زمینهٔ ثابت، هر کدام از تصاویر را از روی تصویر مرجع بسازیم که به آن تصویر مصنوعی یا مدل می‌گوییم. کرنل به ما کمک می‌کند تا عامل مقیاس در تصویر را به دقّت تعیین کنیم. در این روش فرض می‌کنیم تمامی تصاویر تحول یافته تصویر مرجع هستند که ممکن است پس زمینه متفاوتی نیز داشته باشند. پس زمینهٔ مربوط به فازهای مختلف ماه در شب‌های مختلف است. عناصر کرنل را از طریق کمینه کردن اختلاف بین تصویر مصنوعی درست شده و نیز تصویر واقعی برای هر پیکسل تعیین می‌کنیم. تصویر مدل مربوط به هر تصویر گرفته شده M از رابطهٔ زیر

تعیین می‌شود: $M = R \otimes K + B$، که در آن R تصویر مرجع، K کرنل و B پس زمینه است.

این روش در ابتدا توسط آلارد و لاپتون (۱۹۹۸) معرفی شد [۶]. آنها در ابتدا تابع کرنل را بر حسب برخی توابع پایهٔ متعامد بسط دادند و با کمینه کردن اختلاف بین تصویر مصنوعی درست شده و تصویر واقعی، ضرایب بسط را به دست آوردند. برامیچ این روش را بسط داد و نشان داد اگر خود عناصر ماتریس کرنل را به عنوان متغییرها در نظر بگیریم و این متغییرها را با کمینه کردن اختلاف تصاویر به دست بیاوریم، دقت و سرعت در محاسبهٔ کرنل افزایش می‌یابد.

به منظور سرعت بخشیدن این روش و برای کمتر کردن تعداد معادلاتی که باید همزمان حل شوند، تصویر مورد نظر را به ۹ قسمت تقسیم می‌کنیم و کرنل را برای هر قسمت جداگانه حساب می‌کنیم. کرنل‌ها باید در مرز تصاویر همپوشانی داشته باشند و تک مقدار باشند. بنابراین در حین حل معادلات مربوط به هر قسمت شرایط مرزی را نیز در نظر می‌گیریم.

اگر اندازهٔ تصاویر برای مثال ۵۱۲ در ۵۱۲ پیکسل باشد، به جای حل ۵۱۲*۵۱۲ معادلهٔ همزمان، با تقسیم تصاویر ما تنها نیاز داریم که ۹ بار ۱۷۰*۱۷۰ معادله را همزمان حل کنیم. مسلماً وقتی تعداد معادلاتی که باید همزمان حل شوند کاهش می یابد، سرعت حل بیشتر می‌شود. البته نمی‌توانیم تصاویر را بیشتر تقسیم کنیم زیرا عامل مقیاس به درستی تشخیص داده نمی‌شود.

در این مرحله مهم‌ترین پارامتر میزان همپوشانی کرنل‌ها است که باید حدود ۰٫۱ تا ۰٫۲ پیکسل باشد. اگر این عدد را بزرگ‌تر قرار دهیم، سرعت اجرای این مرحله کاهش می یابد. از دیگر پارامتر ها شعاع کرنل است که ما آن را حدود ۲٫۸ تا ۳٫۰ قرار می‌دهیم.

در این مرحله تغییرات ناگهانی نور یک ستاره (تغییرات سریع و موضعی) تشخیص داده نمی‌شود، تنها تغییرات کل تصویر که ناشی از تغییرات آب و هوا در حین گرفتن تصویر است قابل تشخیص است. بنابراین اگر تصاویر واقعی را از مدل‌های ساخته شده کم کنیم، آنچه باقی می‌ماند تنها نقاط روشنی است که مربوط به ستارگان متغییر است، که به آنها تصاویر باقی‌مانده[1] می‌گویند. ۴ نمونه از تصاویر باقی‌مانده در شکل ۴ آمده است.

این روش برای تعیین رویدادهایی که در آنها نور یک ستاره به صورت موضعی بر حسب زمان تغییر بسیار مناسب است؛ برای مثال تشخیص ستاره‌های متغییر، رویدادهای تقویت نور یک ستاره در اثر همگرایی گرانشی و یا گرفت نور یک ستاره به دلیل عبور یک جسم تاریک از مقابل آن و غیره.

۷. کم کردن تصاویر از تصویر مرجع و تشخیص تغییرات نور ستارهٔ چشمه

بعد از کمینه کردن اختلاف بین تصویر واقعی و تصویر مصنوعی ساخته شده، آنها را می‌توان در این مرحله از هم کم کرد. آنچه در تصاویر باقی می‌ماند تنها ستاره‌هایی است که نورشان تغییرات شدید نسبت به تصویر مرجع داشته است. اگر تنها یک ستاره درون تصاویر باقی‌مانده است، پس این ستاره همان ستاره‌ای است که ما به دنبال تغییرات نور آن بر حسب زمان هستیم. اگر شار را در تصاویر باقی‌مانده اندازه بگیریم، این شار همان تغییرات نور ستارهٔ چشمه بر حسب زمان است.

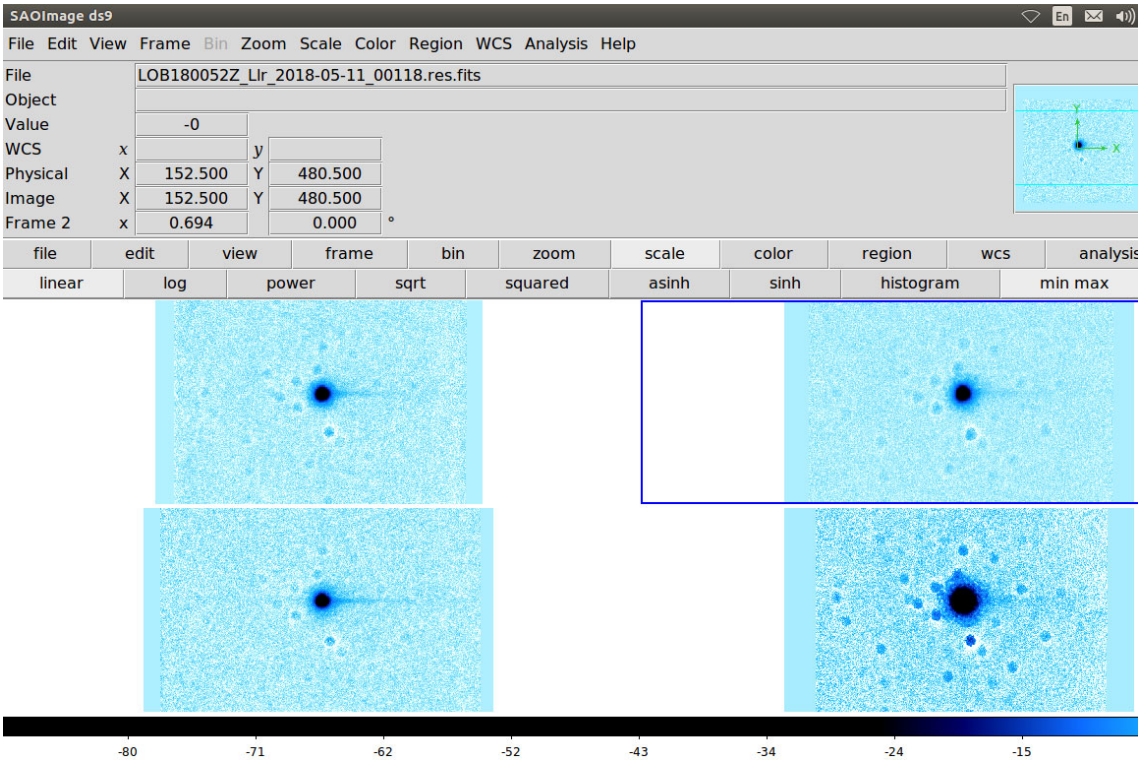
برای رسم منحنی نوری ستارهٔ مورد نظر بر حسب زمان باید بدانیم تغییرات نور ستاره ناشی از چیست و تابع تغییرات آن را بدانیم. در این صورت با کمینه کردن اختلاف بین رصد و مدل می‌توان پارامترهای آزاد درون مدل را تعیین کرد.

در ریزهمگرایی گرانشی پارامترهای آزاد عبارتند از شار ذاتی ستارهٔ چشمه بدون تقویت نور و نیز میزان آمیخته شدن نور ستارهٔ چشمه با نور ستاره‌های مجاورش که درون تابع نقطه گستر ستارهٔ چشمه افتاده‌اند. هر دوی آنها به طول موج رصد و تلسکوپی که با آن رویداد مورد نظر مشاهده شده است، بستگی دارند. در شکل ۵ یک نمونه از رویداد ریزهمگرایی گرانشی به همراه داده‌های گرفته شده به کمک تلسکوپ دانمارک[2] برای این رویداد نمایش داده شده است.

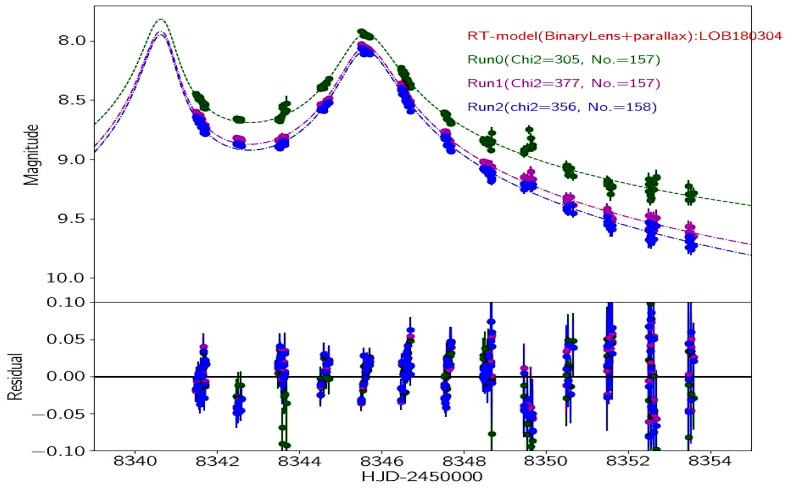
---

۱. Residual images

۲. Danish 1.54 m Telescope (https://www.eso.org/public/teles-instr/lasilla/ danish154/)



شکل ۴. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) ۴ نمونه از تصاویر باقی‌مانده (تصاویر واقعی که از مدل ساخته شده بر مبنای کرنل و تصویر مرجع کم شده است). نقاط تاریک تر مربوط به ستارگان متغییر است.



شکل ۵. (رنگی در نسخهٔ الکترونیکی) نمونه‌ای از منحنی نوری یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی. نقاط داده‌های رصدی هستند و منحنی نوری بهترین مدل برازش شده به داده‌ها. رنگ‌های مختلف داده‌کاهی‌های مختلف را نشان می‌دهد. اختلاف مدل و رصد با مقدار کای ۲ تعیین شده است.

۸. نتیجه‌گیری

در یک رویداد ریزهمگرایی گرانشی، تقویت نور یک ستاره در اثر عبور از میدان گرانشی یک جسم سنگین زمینه که هم راستا با ستاره مورد نظر است، نور یک ستاره با زمان تغییرات شدید دارد. به منظور تشخیص نحوه این تغییرات با زمان (منحنی نوری ستارهٔ مورد نظر) باید داده‌های نجومی گرفته شده از آن ستارهٔ مورد نظر را داده‌کاهی کرد. فرایند داده‌کاهی برای تشخیص تمامی رویدادهای که در آنها نور یک ستارهٔ خاص با

زمان تغییر می‌کند مشابه است. در این مقاله، ما مراحل انجام داده‌کاهی تصاویر گرفته شده از رویداد ریزهمگرایی گرانشی را بیان کردیم. این مقاله برای افرادی که بخواهند داده کاهی انجام دهند بسیار مفید است.

در فرایند داده‌کاهی در ابتدا باید یک تصویر مرجع ساخته شود و سپس تمامی تصاویر باید بر روی تصویر مرجع منطبق شوند. اصولاً این کار به کمک روش مثلثی انجام می‌شود. سپس عامل مقیاس هر تصویر در مقایسه با تصویر مرجع با روش دقیق‌تری (تعیین کرنل) تشخیص داده می‌شود. در این روش هر تصویر را با در نظر گرفتن تحول زمانی تصویر مرجع و یک پس زمینهٔ ثابت می‌سازیم. اختلاف بین تصویرهای مصنوعی ساخته شده و نیز تصاویر اولیّه تغییرات موضعی با زمان مربوط به ستاره‌های متغییر درون میدان دید را نشان می‌دهد.

مراجع

1. B Paczynski, *ApJ* **301** (1986) 503.
2. S Moa and B Paczynski, *ApJ* **374** (1999) 37.
3. D Bramich, *MNRAS* **397** (2009) 2099.
4. S Sajadian, S Rahvar, M Dominik, and M Hundertmark, *MNRAS*, **458** (2016) 3248.
5. E Diolaiti, O Bendinelli, D Bonaccini, L Close, *et al*., A & A **147** (2000) 335.
6. C Alard and R H Lupton, *AJ* **503** (1998) 325