

# آزمایش کنارتاریکی خورشید

آرتین خانعلی، سپهر سلمان یگانه، صالح شاملو احمدی

آزمایشگاه نجوم، ترم تابستان ۱۴۰۲  
دانشکده فیزیک دانشگاه صنعتی شریف

۳۱ تیر ۱۴۰۲

## ۱ مقدمه

در این آزمایش، با پردازش عکس‌های تهیه شده از خورشید، اثر کنارتاریکی<sup>۱</sup> را بررسی می‌کنیم. عکس‌های خورشید توسط استاد و دستیاران آموزشی درس تهیه شده‌اند و در اینجا به جزئیات آن نمی‌پردازیم.

## ۲ ابزار استفاده‌شده

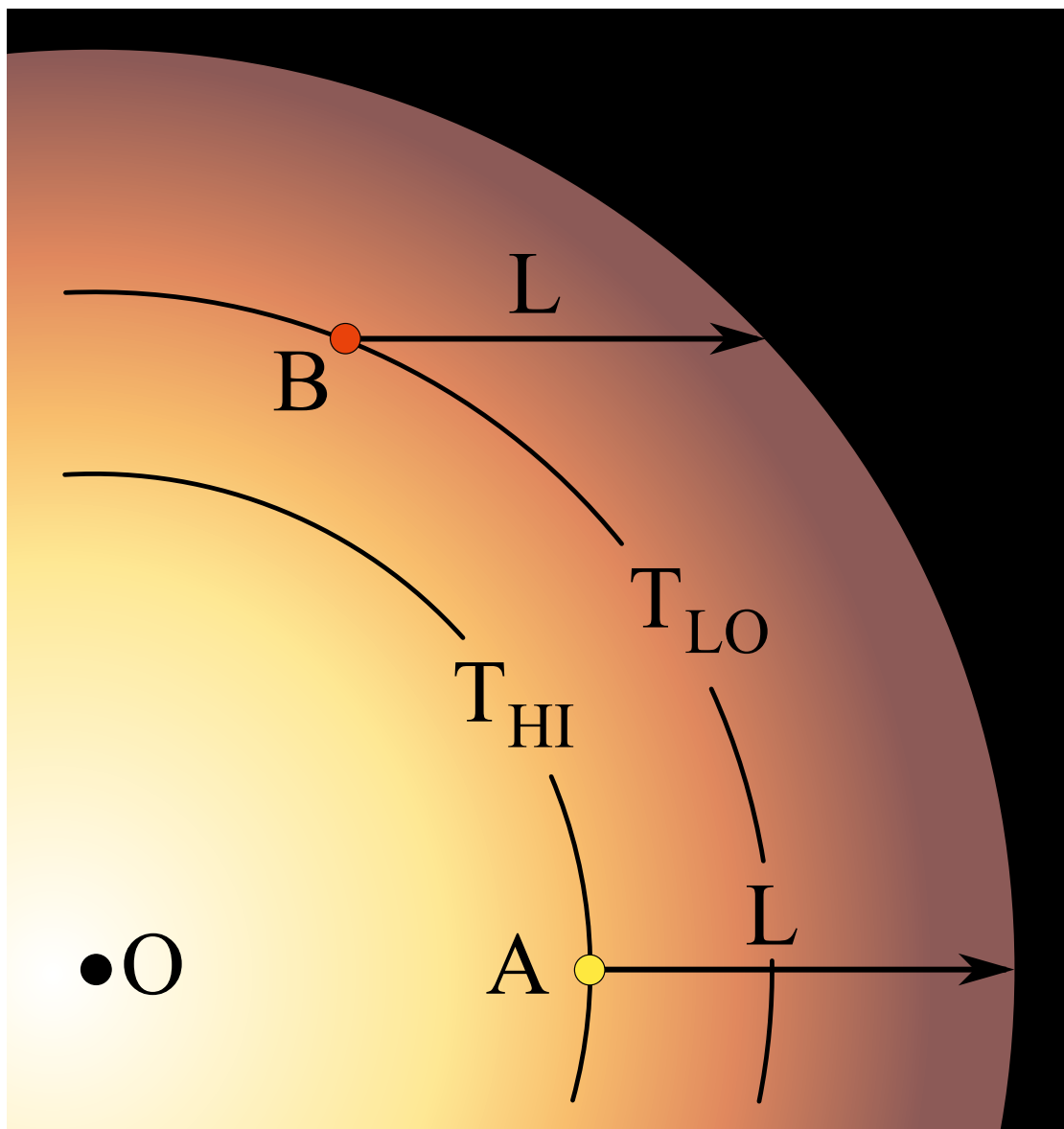
- تلسکوپ ۶ اینچی نیوتونی
- دوربین Canon EOS 1200D
- فیلتر خورشیدی

## ۳ نظریه

کنارتاریکی به این دلیل رخ می‌دهد که در گوشه‌ی خورشید، نور توسط مقدار پلاسمای کمتر در دمای سردتری ساطع می‌شود. می‌توانید به صورت تصویری این موضوع را در شکل ۱ مشاهده کنید.

---

<sup>۱</sup> limb darkening



شکل ۱: توضیح اثر کنار تاریکی. نور مربوط به طول ثابتی از سطح از نظر ناظری در بی‌نهایت، از لایه کم‌دماتر می‌آید.

طبق تقریب ادینگتون، با در نظر گرفتن اثر کنارتاریکی، پروفایل روشنایی خورشید از رابطه

$$\frac{I(\mu)}{I(\circ)} = \frac{2 + 3\mu}{5} \quad (1)$$

بدست می‌آید که  $\mu = \cos \theta$  و  $\theta$  زاویه خط واصل نقطه مورد نظر روی قرص خورشید و مرکز خورشید با خط واصل مرکز قرص خورشید و مرکز خورشید است. این رابطه با فرض اینکه شعاع خورشید به نسبت فاصله زمین از خورشید قابل صرف نظر است بدست آمده (یعنی به اندازه‌ای نیست که روی زاویه پرتوها تأثیر قابل توجهی بگذارد). همچنین این تقریب بر پایه مدل ادینگتون از خورشید است که فرض می‌کند خورشید چگالی ثابت دارد.

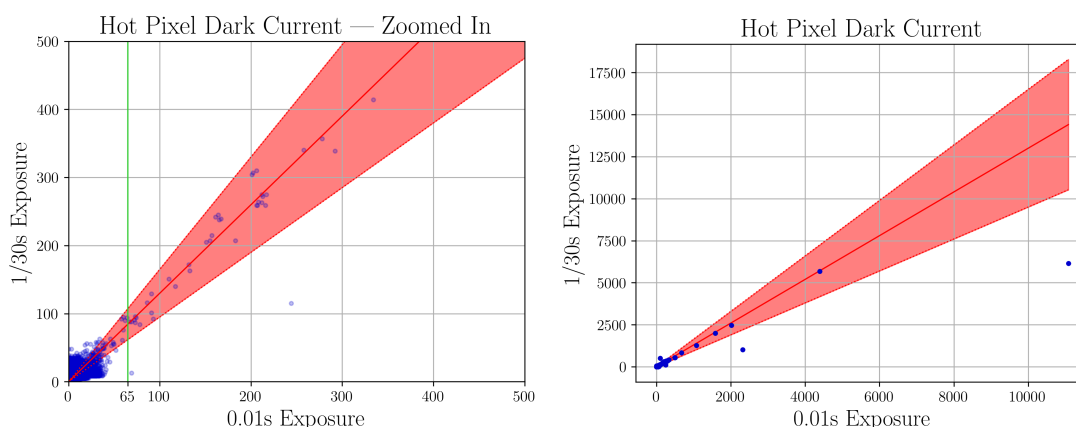
## ۴ پیش پردازش

در این آزمایش عکس صفحه تخت<sup>۲</sup> نداشتیم و فقط عکس‌های جریان تاریک<sup>۳</sup> در دسترس داشتیم. قبل از هر چیز، تصاویر خام دوربین با فرمت CR2 را به فرمت fits تبدیل کردیم. چون خروجی دوربین به صورت rgb نیست اما ما این فرمت را تحلیل و پردازش می‌کنیم، در این مرحله به الگوریتمی برای غیرموزائیکی کردن<sup>۴</sup> نیاز داریم. خوشبختانه الگوریتم‌های پیشرفته فراوانی برای این منظور طراحی شده‌اند. در حال حاضر AMaZE پراستفاده‌ترین الگوریتم غیرموزائیکی کردن است، اما ما از الگوریتم RCD استفاده می‌کنیم که برای لبه‌های نرم در تصویر بهتر عمل می‌کند و پیش فرض بعضی نرم افزارهای رصدی نیز هست. بعد از غیرموزائیکی کردن، کافی است با تبدیل ساختار پیکسل‌ها به استاندارد fits و همچنین استخراج فراداده‌های<sup>۵</sup> دوربین و قرار دادن آن با بقیه اطلاعات مربوطه در header فایل، داده‌ها را در فرمت fits ذخیره کنیم. در مرحله اول پیش پردازش، از عکس‌های جریان تاریک میانه گرفتیم که عکس master جریان تاریک را درست کنیم. سپس مقادیر این عکس را از عکس اصلی کم کردیم تا نویز بایاس و جریان تاریک از عکس اصلی حذف شوند.

مرحله بعدی، پیدا کردن پیکسل‌های «بد» است؛ پیکسل‌های داغ با کم کردن جریان تاریک اصلاح می‌شوند، اما پیکسل‌های بد کاملاً سوخته‌اند و واکنش درست به نور نشان نمی‌دهند. برای پیدا کردن این پیکسل‌ها، از جریان تاریک مربوط به نوردهی دیگری کمک می‌گیریم. در این رصد برای عکس بردار از خورشید از نوردهی ۱/۳۰ ثانیه استفاده کردیم و جریان تاریک اصلی هم مربوط به همین نوردهی بوده، اما علاوه بر آن جریان تاریک مربوط به نوردهی ۱/۰ ثانیه را هم گرفته‌ایم. ابتدا پیکسل‌های داغ را پیدا می‌کنیم. با یک نگاه اجمالی به هیستوگرام فراوانی شدت پیکسل‌ها، برای هر کانال یک حد برای «داغ» بودن انتخاب می‌کنیم. این حد برای کانال قرمز ۸، برای کانال سبز ۱، و برای کانال آبی ۴ واحد است. با رسم شدت پیکسل‌های داغ روی روی نوردهی ۱/۳۰ ثانیه برحسب شدت روی نوردهی ۱/۰ ثانیه، نمودار<sup>۲</sup> بدست می‌آید. می‌بینیم که بیشتر نقاط تقریباً روی یک خط می‌افتند، به جز چند نقطه پرت. این نقطه‌های پرت، همان پیکسل‌های سوخته هستند. برای پیدا کردن آن‌ها، ابتدا سعی می‌کنیم خطی که از بیشتر نقطه‌ها عبور می‌کند را پیدا کنیم. این کار آنقدری که

demosaiicing<sup>۴</sup>  
metadata<sup>۵</sup>

flat frame<sup>۲</sup>  
dark current<sup>۳</sup>



شکل ۲: پراکندگی پیکسل‌های داغ روی نمودار دو شدت. محدوده رنگی، محدوده مجاز است. نقاط پیش از خط سبز در نظر گرفته نمی‌شوند.

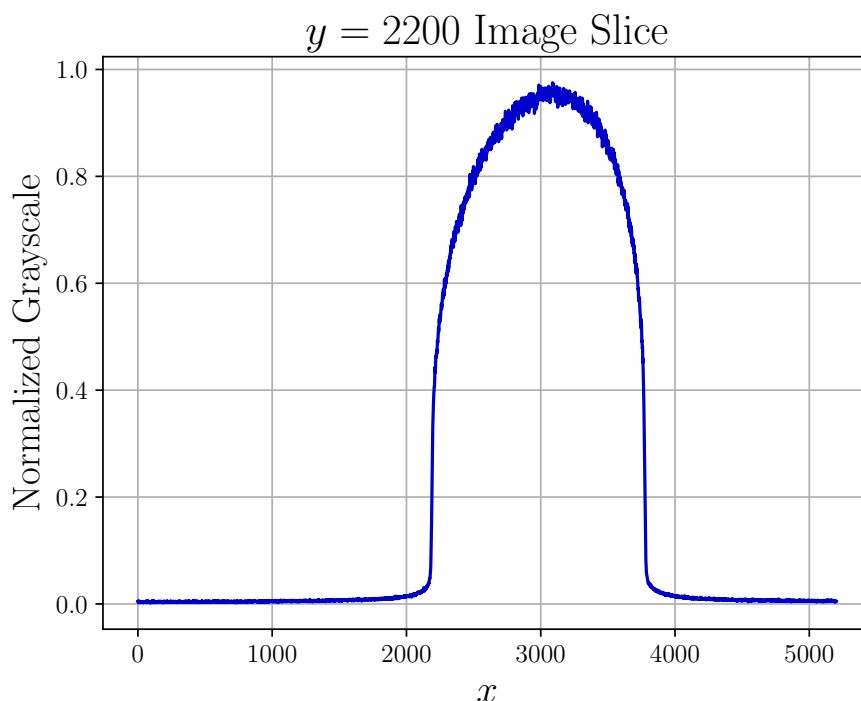
در نگاه اول به نظر می‌رسد ساده نیست، چراکه نقطه‌های پرت متقارن نیستند و شیب خط را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهند. از نظر تئوری، در نوردهی‌های بالا این شیب باید برابر نسبت نوردهی‌ها باشد، اما در اینجا چون به نسبت نوردهی کم است، نویز خوانش<sup>۶</sup> و بایاس تأثیر زیادی دارند. در آخر با کمی سعی و خطا می‌توان شیب اصلی را پیدا کرد که در اینجا حدود ۱/۳ است. حال که خط را پیدا کردیم، نقاطی که بیش از ۳۰ درصد از این خط فاصله دارند را به عنوان پیکسل بد در نظر می‌گیریم. البته پیکسل‌هایی که شدت کمی دارند (در اینجا زیر ۶۵ واحد) را در نظر نمی‌گیریم چون به اندازه‌ی کافی برای یک پیکسل سوخته شدت بالایی ندارند. اینکه چه حدی برای این cut-off مناسب است، زیاد دقیق نیست اما در کل دسته پیکسل‌های کم‌شدت به هم چسبیده را در نظر نمی‌گیریم. بعد از پیدا کردن پیکسل‌های سوخته، آن‌ها را با یک ماسک از تحلیل‌های بعدی خارج می‌کنیم.

در آخر کانال‌های قرمز و سبز و آبی را یکی می‌کنیم (به عبارتی تصویر را «خاکستری» (grayscale) می‌کنیم) و مقادیر پیکسل‌ها را بهنجار می‌کنیم. خاکستری کردن تصویر و بهنجارش روشنایی‌ها، تحلیل را ساده‌تر می‌کنند. البته که اگر از سه کانال رنگی مختلف، نیاز داشته باشیم داده‌های مختلف بگیریم، نباید کانال‌ها را ترکیب کنیم، اما در این آزمایش نیازی به تمام اطلاعات نداریم و فقط روشنایی کلی برای مان مهم است. تصاویر را در مرحله اول در فضای رنگی sRGB ذخیره کردیم، بنابراین از رابطه تبدیل sRGB به grayscale استفاده می‌کنیم.

$$\text{grayscale intensity} = 0.2126r + 0.7152g + 0.0722b \quad (2)$$

این رابطه صرفاً روشنایی نسبی مربوط به چشم انسان که از هر رنگ دیده می‌شود را در نظر می‌گیرد. برای بهنجارش روشنایی هم کفایت روشنایی هر پیکسل را بر بیشینه روشنایی پیکسل‌ها تقسیم کنیم.

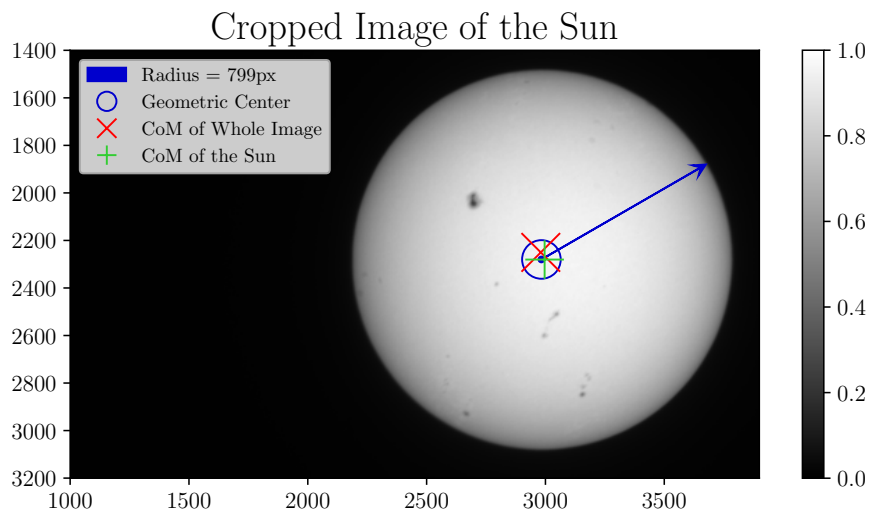
read noise<sup>۶</sup>



شکل ۳: پروفایل روشنایی استفاده شده برای پیدا کردن شدت پیکسل های خورشید.

## ۵ پیدا کردن شعاع و مرکز

اینکه «لبه» خورشید دقیقاً کجا قرار دارد، پاسخ دقیقی ندارد. حتی با استفاده از پروفایل روشنایی، ممکن است جایی را انتخاب کنیم که به چشم انسان از لبه دور باشد. بنابراین مجبوریم این بخش را تقریبی انجام دهیم. ما چشمی در نظر گرفتیم پیکسل هایی که بیش از ۱۵ درصد روشنایی دارند، داخل خورشید قرار دارند. با تقسیم فاصله بیشینه و کمینه ی  $x$  و  $y$  این نقاط بر دو، شعاع خورشید بدست می آید. ما با این روش شعاع خورشید را ۷۹۹ پیکسل بدست آوردیم. برای پیدا کردن مرکز خورشید روش های متعددی وجود دارد. روش های هندسی مثل پیدا کردن تقاطع عمود منصف وترها یا تقاطع عمودهای دو مماس خورشید به نسبت دقیق هستند. وسط بیشینه و کمینه ی  $x$  و  $y$  مرکز خورشید را نشان می دهد که روش هندسی دیگری است که در اینجا استفاده کردیم. روش دیگر، پیدا کردن مرکز جرم روشنایی هاست؛ چون در اینجا تنها منبع نور خورشید است، توقع داریم مرکز تمام روشنایی ها همان مرکز خورشید باشد. این روش دو مشکل دارد. اول اینکه عکس نامتقارن است و با اینکه روشنایی نقاط تاریک به نظر قابل صرف نظر می آید، تأثیر قابل توجهی روی مکان بدست آمده برای مرکز می گذارد. این مشکل را می توانیم با برش مناسب تصویر هنگام پیدا کردن مرکز جرم حل کنیم. مشکل دوم، لکه های خورشید است که باز با وجود اینکه کوچک و قابل صرف نظر به نظر می رسند، لکه های بزرگ تر تأثیر قابل توجهی روی مکان مرکز جرم دارند. بنابراین بهتر است از همان روش هندسی استفاده کنیم.



شکل ۴: تصویر بردیده شده خورشید با مشخص کردن شعاع و مرکزهای پیداشده با روش های مختلف.

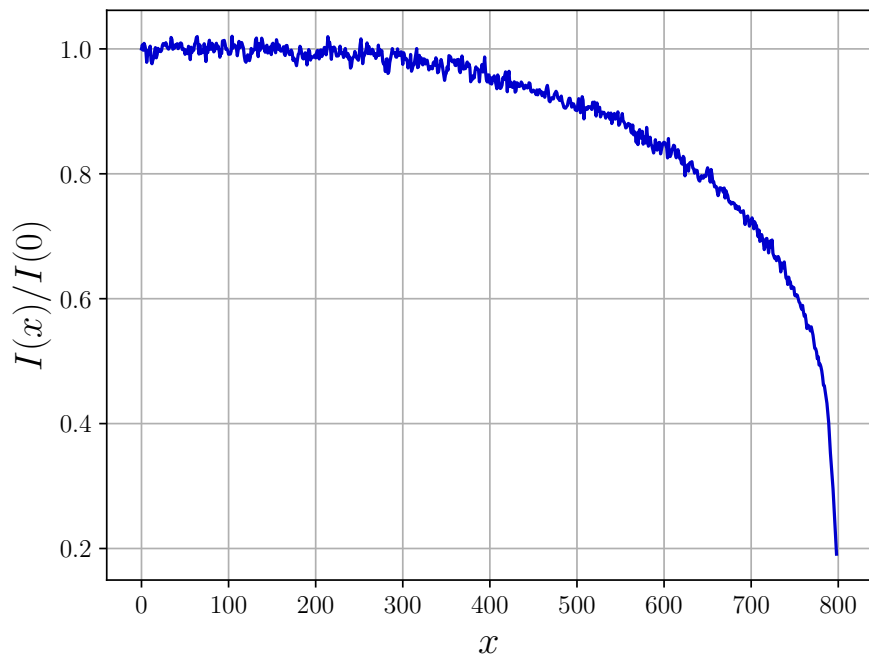
## ۶ پروفایل روشنایی و تقریب ادینگتون

برای گرفتن پروفایل روشنایی، کافی است شعاع افقی به سمت راست (ساعت ۳) را در نظر بگیریم. این شعاع به نظر لکه ای ندارد و داده گیری روی آن راحت تر است چون زاویه ای ندارد، پس الگوریتم خط کشی نیاز ندارد. برای مقایسه پروفایل روشنایی آن با تقریب ادینگتون، باید پارامتر  $\mu$  را برحسب فاصله از مرکز قرص بدست آوریم. با کمی هندسه ساده،

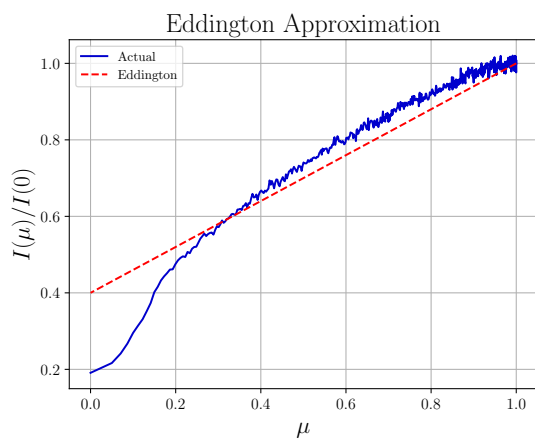
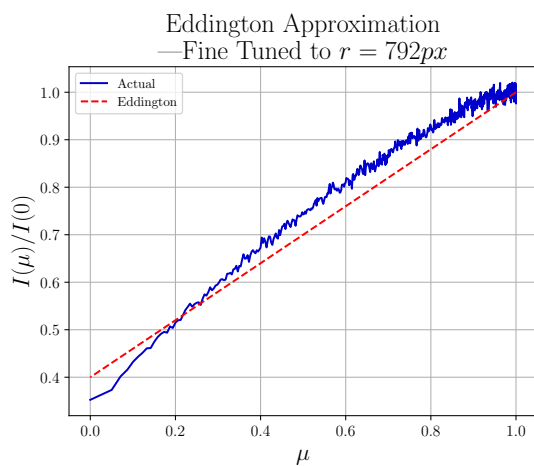
$$\mu = \cos \theta = \sqrt{1 - \sin^2 \theta} = \sqrt{1 - \frac{x^2}{r^2}} \quad (3)$$

که  $x$  فاصله در صفحه از مرکز قرص و  $r$  شعاع خورشید است. با رسم پروفایل روشنایی برحسب  $\mu$  و مقایسه آن با تقریب ادینگتون، می بینیم در  $\mu$  های کوچک این تقریب خوب نیست اما در  $\mu$  های بزرگ تر این تقریب به نسبت خوب است. با تنظیم شعاع خورشید برای بهینه کردن تقریب ادینگتون، می توانیم فیت شدن آن را بهتر کنیم که نشان می دهد مشکل خوب نبودن تقریب برای  $\mu$  های کوچک ربطی به خود تقریب ادینگتون ندارد و به دلیل مبهم بودن فرایند انتخاب لبه خورشید است.

Horizontal Line, Going to the Right  
from the Center of the Sun



شکل ۵: پروفایل روشنایی برحسب فاصله از مرکز قرص



شکل ۶: مقایسه تقریب ادینگتون با دو شعاع متفاوت: شعاع بدست آمده از روشنایی و شعاع تنظیم شده.

## ۷ نمونه برداری روشنایی تصویر

در ناحیه کوچکی در وسط خورشید، میانگین و انحراف معیار روشنایی به ترتیب  $10^4 \cdot 3$  و  $10^1$  واحد (به ترتیب ۹۵ و ۰/۹ درصد در حالت بهنجار) هستند. در ناحیه کوچکی در گوشه‌های تصویر، دور از خورشید، میانگین و انحراف معیار روشنایی به ترتیب ۴۳ و ۸ واحد (به ترتیب ۰/۴ و ۰/۰۷ درصد در حالت بهنجار) هستند. مقادیر روشنایی دور از خورشید همچنان از نویز رندوم بزرگ‌تر هستند، چراکه روشنایی خورشید آنقدر زیاد است که این ناحیه را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. همچنین با توجه به اعداد بدست آمده، واضح است که نسبت سیگنال به نویز داخل خورشید بیشتر از بیرون آن است که مطابق انتظارمان است.

## ۸ نتیجه‌گیری

۱. تقریب ادینگتون به نسبت سادگی خود، دقت خوبی دارد، اما برای فیت کردن دقیق‌تر پروفایل روشنایی خورشید، باید ثوابت بهتری پیدا کنیم (به نظر می‌رسد پارامتر  $\mu$  پارامتر خطی‌سازی مناسبی باشد).
۲. پیدا کردن لبه خورشید دقیق یا سراسر نیست و وابسته به کاربرد مورد نظرمان متفاوت است.
۳. روش هندسی برای پیدا کردن مرکز خورشید از روش مرکز جرم دقیق‌تر است.
۴. نور خورشید، حتی از پشت فیلتر، بسیار شدید است و کل تصویر را تحت تأثیر قرار می‌دهد.