

به نام آنکه هستی نام از او یافت

درسنامه

تلسکوپ و ابزارهای رصدی



نویسنده: فاطمه زرگرباشی

بازبینی و اصلاح: آرمان وثیق زاده - شهابالدین محین



فهرست

5	تاریخچه
6	تلسکوپ چیست؟-انواع تلسکوپها
9	انواع ابیراهی
9	ابیراهی رنگی
9	ابیراهی کروی
10	ابیراهی کما (گیسو)
11	آستیگماتیسم
12	پارامترهای تلسکوپ- تعاریف و روابط
22	قدرت تفکیک
22	قدرت تفکیک ناشی از اندازه‌ی پیکسل‌ها
23	قدرت تفکیک در اثر پراش
26	اثرهای جو
26	شکست جوّی
27	پارامتر دید
29	چشمک زدن
29	قرمز شدگی
30	اپتیک تطبیقی
32	آشکارساز و CCD
34	پردازش تصویر

34	تصحیح تصویر
34	تصویر زمینه (<i>Bias</i>)
35	تصویر میدان تخت (<i>Flat Field</i>)
35	تصویر تاریک (<i>Dark</i>)
37	کالیبره کردن تصویر
39	سیگنال به نویز
39	سیگنال
40	نویز
40	اثر ساچمه‌ای (<i>Shot Noise</i>):
40	نویز بازخوانی (<i>Readout Noise</i>):
41	نویز جریان تاریک (<i>Dark Current Noise</i>):
41	تبدیل سیگنال به نویز به خطا در قدر
42	رصد در فیلترهای مختلف
42	امواج رادیویی
43	فروسرخ
43	پرتوهای ایکس
44	تداخل‌سنجی
46	مقر تلسکوپ‌ها
47	مسائل
59	پیوست 1
59	چند قانون کلی در شکست و بازتاب نور
59	قانون اسنل

60	 قانون بازتاب
60	 فرمول تصویر
62	 پیوست 2
62	 اثبات رابطه‌ی عدسی سازان
64	 منابع و مآخذ

تاریخچه

از زمانی که انسان‌های اولیه در غار زندگی می‌کردند تا کنون، آسمان شب با زیبایی‌های مسحورکننده‌ی خود همیشه موجب حیرت انسان شده است و در ذهن او سوالات بسیاری را برانگیخته است. روح کنجکاو و جستجوگر انسان هم بدنبال یافتن پاسخ این پرسش‌ها آسمان را به دقت زیر نظر گرفت و این‌گونه بود که علم نجوم تولد یافت و روز به روز رشد کرد.



اولین ابزار نجومی انسان‌ها چشم بود. از ماقبل تاریخ تا کنون، بشر آسمان‌ها را با این "تلسکوپ" باشکوه و موثر بررسی کرده است. چشم، مانند هر ابزار دیگری، مثل یک فیلتر عمل می‌کند؛ یعنی نور را فقط در بعضی طول‌موج‌ها آشکار می‌کند. اگر یک سیگنال که در همه‌ی طول‌موج‌ها روشنایی یکسانی دارد وارد چشم شود، چشم آن را آن شکلی نمی‌بیند! بلکه نوری که در بازه‌ی 500 تا 550 نانومتر است را روشن‌ترین می‌بیند. در بیرون ناحیه‌ی باریک مرئی (ناحیه مرئی: 400 تا 700 نانومتر)، چشم تقریباً هیچ سیگنالی را آشکار نمی‌کند.

بعد از اینکه گالیله برای اولین بار تلسکوپ خود را به سمت ماه و سیارات نشانه رفت، تلسکوپ‌های زیادی ساخته شدند که رفته‌رفته بزرگ‌تر و پیچیده‌تر می‌شدند. اما هنوز مردم نمی‌دانستند که طول‌موج‌های دیگری هم علاوه‌بر ناحیه‌ی مرئی وجود دارد. تا اینکه ویلیام هرشل در سال 1800 میلادی فروسرخ را کشف کرد. انسان‌ها فهمیدند طول‌موج‌هایی وجود دارد که چشم آنها قابلیت آشکارسازی آن طول‌موج‌ها را ندارد. طولی نکشید که ابزارهایی برای آشکارسازی نور در این طول‌موج‌ها تولید شد. در طی جنگ جهانی دوم، آشکارسازی سیگنال‌های رادیویی پیشرفت چشمگیری کرد.

بخاطر وجود جو زمین، کشف تابش‌های فروسرخ دور، فرابنفش، ایکس و گاما از منابع نجومی تا نیمه‌ی دوم قرن بیستم به تاخیر افتاد. پرتاب اسپوتنیک توسط شوروی در سال 1957 طلوعی برای عصر فضایی، عصری غنی از کشفیات نجومی بود.

نجوم اکنون به لطف تلسکوپ‌ها و سایر ابزارهای مرتبط، در عصر اکتشافات قرار دارد. بنابراین ضروری‌ست که فهمی از اینکه این تکنولوژی چگونه رازهای اشیای نجومی را آشکار می‌کند، داشته باشیم.

تلسکوپ چیست؟ - انواع تلسکوپ‌ها

تلسکوپ¹ وسیله‌ای برای دیدن اجرام آسمانی با استفاده از تابش الکترومغناطیس است. وظیفه‌ی یک تلسکوپ این است که هر چه بیشتر نور را جمع کند و آن را روی یک آشکارساز کانونی کند. معمولاً دو جزء اصلی در این عمل سهیم‌اند: یک سطح که نور را جمع‌آوری و کانونی می‌کند که شیئی نامیده می‌شود (همین طور عدسی یا آینه‌ی اولیه نیز نامیده می‌شود). و یک دستگاه (آشکارساز) که سیگنال رسیده را آشکار و به اطلاعات کامپیوتری تبدیل می‌کند. این دقیقاً همان کاری‌ست که چشم انسان انجام می‌دهد. عدسی چشم، نور را جمع می‌کند و سپس آشکارساز چشم، آن را به سیگنال‌های الکتریکی تبدیل می‌کند که برای تحلیل به سمت مغز فرستاده می‌شوند. تلسکوپ‌ها مانند چشم‌های غول‌آسا هستند!

نور در طول موج‌های مرئی معمولاً توسط یک عدسی یا آینه‌ی خمیده جمع‌آوری و کانونی می‌شود. طبیعی‌ست که هرچه سطح جمع‌آورنده‌ی نور بیشتر باشد، تصاویر روشن‌تری روی آشکارساز ثبت خواهند شد؛ چون سطح بزرگ‌تر مقدار بیشتری از درخشندگی ستاره را جمع‌آوری می‌کند. بدلیل اینکه چشمه‌های نجومی معمولاً بسیار کم نور هستند، تا جایی که هزینه‌ها و ساختارهای مکانیکی اجازه دهند، سعی می‌شود تلسکوپ‌های بزرگ‌تری ساخته شود. تلسکوپی که گاليله ساخت، یک تلسکوپ شکستی بود که از دو عدسی تشکیل شده بود؛ اما در تلسکوپ‌های بزرگ معمولاً از آینه بجای عدسی استفاده می‌کنند. چون اولاً عدسی را فقط می‌توان از لبه‌های آن نگه داشت و یک عدسی بزرگ به خاطر وزن زیادش به مرور زمان شکم می‌دهد و شکل ایده‌آل خود را از دست می‌دهد؛ اما آینه را می‌توان به راحتی از پشت نگه داشت. هم چنین، ساخت عدسی بزرگ از آینه سخت‌تر است. زیرا باید کل شیشه‌ی عدسی بدون ایراد باشد و از هر دو طرف بسیار دقیق صیقل داده شده باشد. اما برای ساخت آینه فقط کافی‌ست سطح بازتاب‌کننده‌ی آن را به خوبی صیقل دهیم. دلیل دیگر استفاده از آینه بجای عدسی، ابیراهی رنگی است که در بخش بعدی بیشتر درباره‌ی آن توضیح می‌دهیم.

تلسکوپ‌های بازتابی انواع مختلفی دارند. ساده‌ترین نوع تلسکوپ بازتابی فقط یک آینه‌ی اولیه دارد که نور را بازتاب و کانونی می‌کند و آشکارساز (یا منجم) در بالای لوله‌ی تلسکوپ در صفحه‌ی کانونی قرار می‌گیرد که البته جلوی رسیدن بخشی از نور به آینه‌ی اصلی را می‌گیرد. به تلسکوپ‌هایی که ساختار این چنینی دارند، **کانون اصلی می‌گویند**.

اگر آشکارساز خیلی بزرگ باشد، جلوی مقدار زیادی از نور در تلسکوپ کانون اصلی گرفته می‌شود. نیوتن اولین کسی بود که راه‌حلی برای این مشکل یافت. او یک آینه‌ی تخت را به صورت مورب در جلوی آینه‌ی اولیه قرار داد تا نور بازتاب‌شده توسط آینه‌ی اولیه را در جایی کنار و بیرون از لوله‌ی تلسکوپ کانونی کند. درست است که این آینه‌ی ثانویه هم جلوی مقداری از نور را می‌گیرد اما اگر نسبت سطح آینه‌ی اولیه به ثانویه خیلی زیاد باشد، میتوان این از بین رفتن نور را مینیمم کرد. این طراحی **تلسکوپ نیوتنی** این مشکل

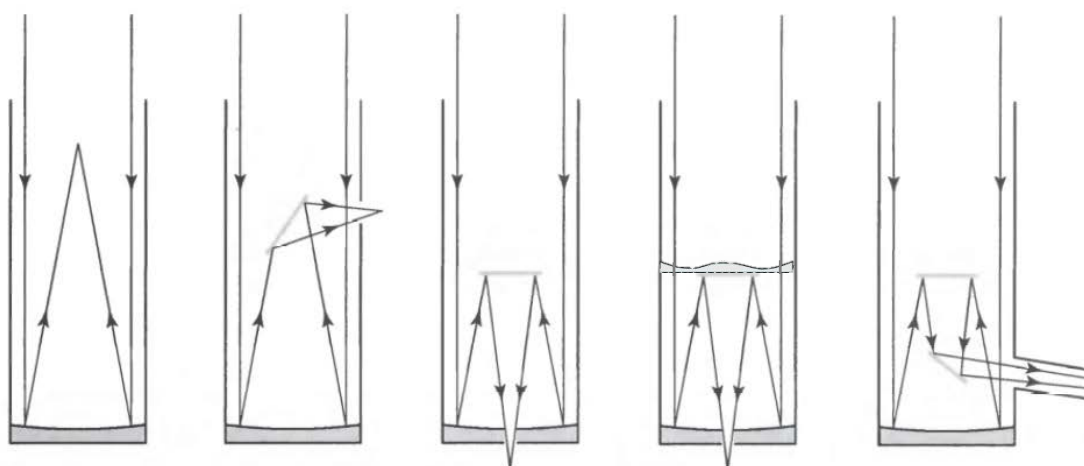
¹ واژه‌ی تلسکوپ برگرفته از دو کلمه‌ی یونانی "تله" به معنی دور و "اسکوپین" به معنی دیدن است.

را دارد که بدلیل دور بودن محل آشکارساز (یا چشمی) از مرکز جرم سیستم، اگر از آشکارساز سنگینی استفاده شود گشتاور زیادی به سیستم وارد می‌شود.



ادوین هابل در حال کار کردن با تلسکوپ کانون اصلی در رصدخانهی پالومار

چون قسمتی از آینه‌ی اصلی که مقابل آینه‌ی ثانویه قرار می‌گیرد در هر صورت بی‌استفاده است، می‌توان آن را سوراخ کرد و با آینه‌ی ثانویه نور را از آن سوراخ به پشت لوله‌ی تلسکوپ هدایت کرد. در این صورت آشکارساز (یا منجم) می‌تواند پشت تلسکوپ و نزدیک مرکز جرم آن قرار بگیرد. در این طراحی که **کاسگرین** نامیده می‌شود، معمولاً از یک آینه‌ی ثانویه‌ی محدب استفاده می‌کنند تا بدون نیاز به طولانی‌تر کردن لوله‌ی تلسکوپ، فاصله‌ی کانونی موثر تلسکوپ افزایش یابد.



تلسکوپ کانون اصلی

تلسکوپ نیوتنی

تلسکوپ کاسگرین

تلسکوپ اشمیت کاسگرین

تلسکوپ کوده

تلسکوپ‌هایی که از آینه‌های کروی ساخته شده‌اند، مشکل ابیراهی کروی² دارند. با این که استفاده از آینه‌های سهمی‌گون این ابیراهی را برطرف می‌کند اما ساخت این آینه‌ها بسیار سخت است. راه‌حلی که برای این مشکل ارائه شد، طرح تلسکوپ **اشمیت-کاسگرین** نامیده می‌شود که همان تلسکوپ کاسگرین با آینه‌ی کروی است با این تفاوت که در آن یک لنز (لنز اشمیت) برای تصحیح ابیراهی کروی در ابتدای لوله‌ی تلسکوپ قرار داده شده است.

یک نوع دیگر از تلسکوپ‌های بازتابی که **کوده** نامیده می‌شود، با کمک یک آینه‌ی سوم نور بازتاب‌شده توسط آینه‌ی ثانویه را به اتاقک کوده هدایت می‌کند. مزیت این تلسکوپ‌ها این است که فاصله‌ی کانونی آنها را می‌توان خیلی زیاد کرد؛ بنابراین برای کارهایی که به قدرت تفکیک بالا احتیاج دارند مناسب‌اند.

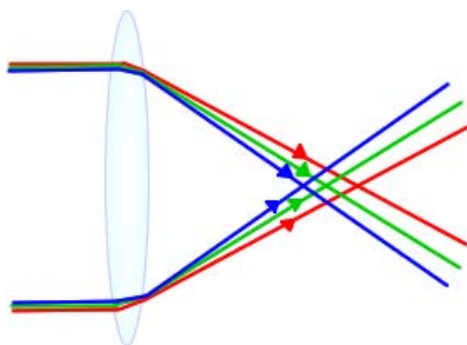
² ابیراهی کروی را هم در بخش بعد مورد بررسی قرار می‌دهیم.

انواع ابیراهی

در سیستم‌های نوری هر انحرافی از تصویر کامل تحت عنوان ابیراهی مطرح می‌شود. در این بخش چند نوع ابیراهی مهم را بررسی می‌کنیم.

ابیراهی رنگی

وقتی نور وارد عدسی می‌شود، شکسته می‌شود. زاویه‌ی شکست پرتو به زاویه‌ی فرود آن و همچنین به ضریب شکست محیط‌های اول و دوم بستگی دارد. اما ضریب شکست تابعی از طول‌موج است. یعنی در یک محیط خاص ضریب شکست نور برای طول‌موج‌های متفاوت فرق دارد. این تفاوت باعث می‌شود پرتوهایی که با طول‌موج‌های متفاوت وارد عدسی می‌شوند، با زاویه‌ای مختلفی شکسته شوند و بنابراین در نقاط متفاوتی کانونی می‌شوند. بدین ترتیب فاصله‌ی کانونی نور آبی کمی کوتاه‌تر از فاصله‌ی کانونی نور قرمز می‌شود که باعث می‌شود تصویر واضح تشکیل نشود. برای مثال اگر چشمی را به گونه‌ای تنظیم کنیم که نقطه‌ی کانونی شدن نور قرمز روی صفحه‌ی کانونی آن باشد، از پشت چشمی یک هاله‌ی آبی رنگ در اطراف تصویر مشاهده می‌کنیم.

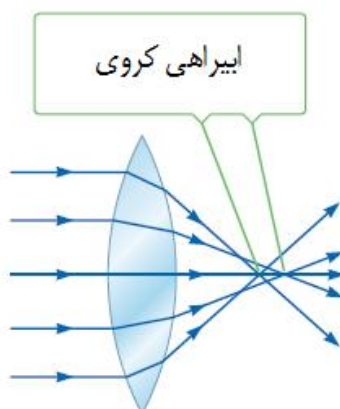


زاویه‌ی بازتاب ربطی به طول‌موج پرتو ندارد؛ بنابراین ابیراهی رنگی فقط برای تلسکوپ‌های شکستی وجود دارد. همچنین این نوع ابیراهی برای نور تک‌فام بوجود نمی‌آید. برای تصحیح ابیراهی رنگی می‌توان از عدسی‌هایی که ترکیبی از یک عدسی واگرا و یک عدسی همگرا هستند استفاده کرد. این عدسی‌ها به عدسی‌های آکروماتیک موسوم‌اند. (مساله 50)

ابیراهی کروی

همه‌ی پرتوهای نوری رسیده از منبع دور نقطه‌ای (مثل ستاره)، در تلسکوپ‌های متشکل از آینه‌های کروی، در یک نقطه کانونی نمی‌شوند. نوری که به قسمت مرکزی آینه برخورد می‌کند نسبت به نور برخوردی به لبه‌ی خارجی کمتر کانونی می‌شود. از این رو تصویر نسبت به حالتی که ابیراهی وجود ندارد، دارای وضوح

کمتری است. در مورد عدسی‌های کروی هم پدیده‌ی مشابهی اتفاق می‌افتد و پرتوهایی که از لبه‌های عدسی عبور می‌کنند نسبت به پرتوهایی که به مرکز نزدیک‌ترند در فاصله‌ی نزدیک‌تری به عدسی کانونی می‌شوند.



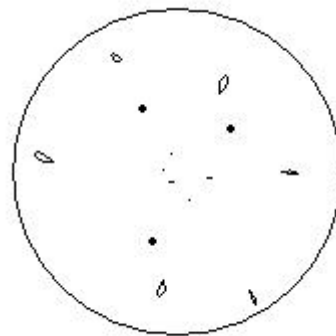
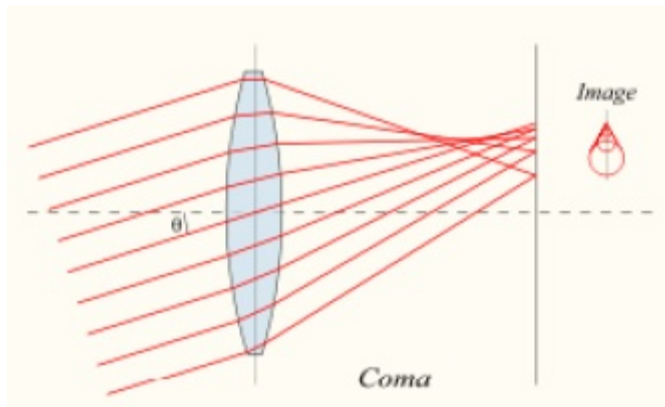
با استفاده از خواص سهمی می‌توان نشان داد که یک دسته پرتوهای موازی که به آینه‌ی سهموی برخورد و بازتاب شوند، همگی در کانون سهمی جمع می‌شوند.³ بدین ترتیب با جایگزین کردن آینه‌های سهموی بجای آینه‌های کروی می‌توان اثر ابیراهی کروی را در تلسکوپ‌های بازتابی برطرف کرد. در تلسکوپ‌های شکستی هم برای رفع ابیراهی کروی می‌شود از لنزهای تصحیحی استفاده کرد. هم‌چنین اگر از یک عدسی کوژ-تخت (عدسی که یک طرف آن محدب و طرف دیگر آن تخت است) استفاده کنیم، می‌توانیم ابیراهی کروی را کاهش دهیم. یکی دیگر از راه‌های کاهش ابیراهی کروی استفاده از عدسی‌ها و آینه‌هایی با نسبت کانونی زیاد است.

ابیراهی کما (گیسو)

در اثر ابیراهی کما، پرتوهایی که با محور اپتیکی موازی نیستند و با زوایای متفاوتی نسبت به محور اپتیکی وارد سیستم می‌شوند، در یک نقطه کانونی نمی‌شوند. این ابیراهی که برای آینه‌های سهموی هم وجود دارد، باعث می‌شود تصویر یک جسم نقطه‌ای بجای اینکه نقطه‌ای باشد، دایروی بشود. هرچه از مرکز عدسی یا آینه دورتر شویم، اثر ابیراهی کما بیشتر می‌شود. بدین ترتیب، ستاره‌ها (بویژه در کناره‌های میدان دید) به شکل یک دنباله‌دار دیده می‌شوند.⁴

³ مساله‌ی 2

⁴ نام کما (coma) برای این ابیراهی مخفف عبارت cometlike appearance است که به معنی "ظاهر شبیه دنباله‌دار" است.

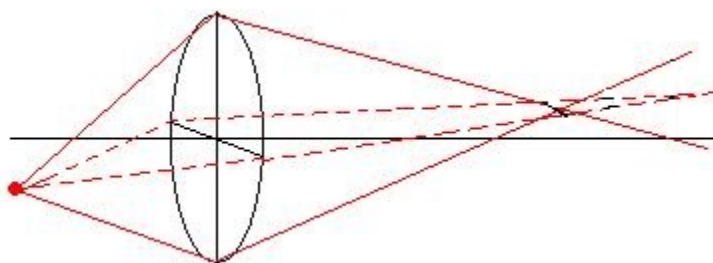


کما بیشتر در سیستم‌هایی که نسبت کانونی کوچکی دارند ایجاد مشکل می‌کند. برای تصحیح نسبی کما در حضور ابیراهی کروی اگر دهانه‌ی ورودی را تنگ‌تر کنیم ستاره‌هایی که کما تصویر آنها را خراب کرده است دیده نخواهند شد. هم چنین در عدسی‌های آکروماتیکی که ابیراهی کروی در آنها رفع شده باشد، ابیراهی کما نیز تا حد زیادی برطرف خواهد شد.

آستیگماتیسم

خطای آستیگماتیسم ناشی از این است که پرتوهایی که در دو صفحه‌ی عمود بر هم (برای مثال در صفحه‌های موازی و عمود بر افق) وارد سیستم می‌شوند، در فواصل کانونی متفاوتی جمع می‌شوند. این باعث می‌شود تصویر یک منبع نقطه‌ای به شکل یک بیضی و یا خط دیده شود. آستیگماتیسم هم مانند کما برای پرتوهایی که از محور اپتیکی دورتر هستند شدیدتر است.

برطرف کردن ابیراهی آستیگماتیسم دشوار است. برای این کار باید مکان، شکل و ضرایب شکست اجزای شیئی به دقت تعیین شود.



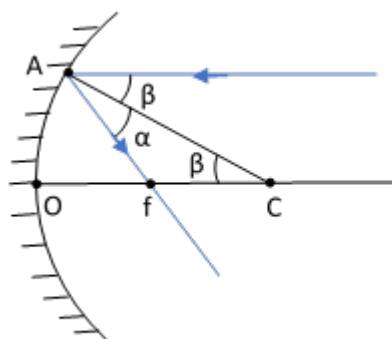
ابیراهی آستیگماتیسم

انواع دیگری از ابیراهی هم وجود دارند اما در اینجا به همین اکتفا می‌کنیم.

پارامترهای تلسکوپ - تعاریف و روابط⁵

وقتی یک دسته پرتو موازی به آینه یا عدسی همگرا می‌خورند، در یک نقطه جمع می‌شوند که اصطلاحاً کانون نامیده می‌شود. فاصله‌ی کانون تا عدسی یا آینه را **فاصله‌ی کانونی** می‌نامند و با f نشان می‌دهند. برای آینه‌ها و عدسی‌های واگرا، کانون محل برخورد امتداد مسیر پرتوهای واگرا در پشت آینه یا عدسی است که بدلیل اینکه مکان واقعی تلاقی پرتوها نیست (زیرا پرتوهای واگرا اصلاً تلاقی ندارند)، کانون مجازی نامیده می‌شود. فاصله‌ی کانونی مجازی، منفی مقدار فاصله‌ی کانون از عدسی یا آینه‌ی واگرا است ($f < 0$). چون ضریب شکست نور تابعی از طول‌موج است، فاصله‌ی کانونی در عدسی‌ها به طول‌موج پرتو بستگی دارد (f_λ). به دلیل همین وابستگی‌ست که تلسکوپ‌های شکستی دچار ابیراهی رنگی می‌شوند. در آینه‌ها فاصله‌ی کانونی مستقل از طول‌موج است.

حال می‌خواهیم رابطه‌ای برای فاصله‌ی کانونی یک آینه‌ی همگرا پیدا کنیم. آینه را قسمتی از کره‌ای به شعاع R می‌گیریم.



در شکل بالا پرتویی که موازی با محور اصلی به آینه تابیده و بازتاب شده، نشان داده شده است. خطی که از مرکز دایره یعنی نقطه C به محل برخورد آینه و پرتو وصل می‌کنیم، بر سطح آینه عمود است. بنابراین طبق قانون بازتاب:

$$\alpha = \beta$$

اما طبق قضیه‌ی خطوط موازی و مورب، زاویه‌ی راس C هم با β برابر است. بنابراین مثلث AfC متساوی‌الساقین بوده و $Af = fC$.

$$Af = \frac{AC \sin \beta}{\sin(\alpha + \beta)} = \frac{AC \sin \beta}{\sin 2\beta} = \frac{AC}{2 \cos \beta}$$

چون معمولاً آینه تنها بخش کوچکی از کره‌ی اولیه است، یعنی عملاً $\beta \ll 1$. پس:

⁵ توصیه می‌شود قبل از خواندن این بخش، پیوست 1 را مطالعه کنید.

$$Af \approx \frac{AC}{2}$$

همچنین بخاطر کوچک بودن β می توان گفت:

$$AC \approx OC$$

بنابراین:

$$Of = OC - fC = OC - Af$$

$$\approx OC - \frac{OC}{2} = \frac{OC}{2}$$

و در نهایت:

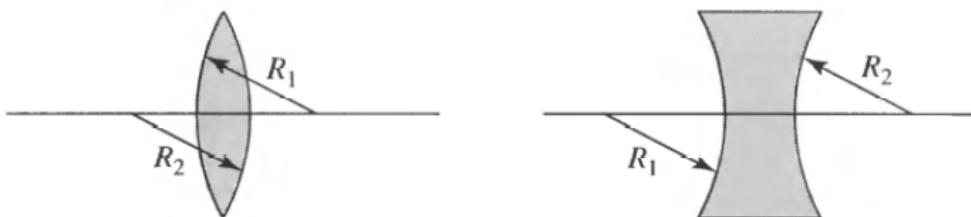
$$f \approx R/2$$

یعنی فاصله ی کانونی آینه های کروی نصف شعاع آنهاست. به راحتی مشابه این رابطه برای آینه های واگرا نیز اثبات می شود.

توجه به این که ما در اینجا تقریب زدیم که $1 \ll \beta$ جالب خواهد بود. این تقریب برای عدسی هایی که نسبت فاصله ی کانونی آنها به دهانه شان (نسبت کانونی - به دو صفحه بعد رجوع کنید.) زیاد است، تقریب خوبی است. اما برای عدسی هایی با نسبت کانونی کوچک چه؟؟ چگونه می توان فاصله ی کانونی را یافت؟ پاسخ در این نکته نهفته است که در واقع عدسی های کروی همه ی پرتوها را در یک نقطه کانونی نمی کنند. بلکه پرتوهایی که به محور اصلی دورتر یا نزدیک ترند در نقاط متفاوتی جمع می شوند. بنابراین فاصله ی کانونی واحدی پیدا نخواهیم کرد. این همان ابیراهی کروی است که در بخش قبل هم گفته بودیم. بنابراین افزایش نسبت کانونی تلسکوپ یکی از راه های کم کردن ابیراهی کروی است.

اما برای فاصله ی کانونی یک عدسی چه می توان گفت؟ یک عدسی در نظر بگیرید که از دو بخش از کره هایی به شعاع های R_1 و R_2 تشکیل شده است. (شکل زیر) رابطه ای که فاصله ی کانونی را به این شعاع ها و ضریب شکست عدسی ربط می دهد، **قانون عدسی سازان** نامیده می شود که بصورت زیر است:

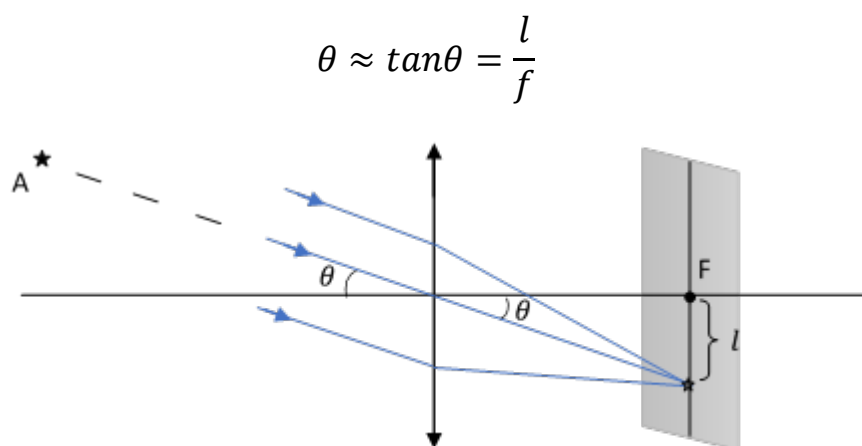
$$\frac{1}{f_\lambda} = (n_\lambda - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$



توجه کنید که برای عدسی‌های واگرا R_1 و R_2 مقادیری منفی هستند.⁶ در پیوست 2 اثباتی برای رابطه‌ی عدسی‌سازان آورده‌ایم.

وقتی از یک جسم گسترده با استفاده از آینه یا عدسی تصویر تشکیل می‌دهیم، تصویر آن یک تصویر گسترده در صفحه‌ی کانونی خواهد بود. صفحه‌ی کانونی بنا به تعریف صفحه‌ای است که بر محور اصلی عمود است و از کانون می‌گذرد. آشکارساز مورد نظر مثلاً فیلم عکاسی و یا سی‌سی‌دی⁷ روی صفحه‌ی کانونی قرار می‌گیرد. هم‌چنین اگر بخواهیم از چشمی استفاده کنیم، باید فاصله‌ی بین شیئی و چشمی را به گونه‌ای تنظیم کنیم که صفحات کانونی آن‌ها بر یکدیگر منطبق شود تا بدین ترتیب پرتوهایی که از چشمی به چشم ما وارد می‌شوند با یکدیگر موازی باشند.⁸

اجرام نجومی معمولاً در فاصله‌ای آن چنان دوری قرار دارند که می‌توان آنان را منابع نقطه‌ای در نظر گرفت و پرتوهایی که از هر منبع به ما می‌رسند، موازی خواهند بود. منبع A را در نظر بگیرید که زاویه‌ی آن با محور اصلی تلسکوپ θ است. تصویر A روی صفحه‌ی کانونی در فاصله‌ی l از کانون تشکیل می‌شود. با توجه به شکل زیر:



$$\theta \approx \tan \theta = \frac{l}{f}$$

کمیت $\frac{\theta}{l}$ یا به طور معادل $\frac{d\theta}{dl}$ ، **مقیاس صفحه** نامیده می‌شود.

$$\frac{d\theta}{dl} = \frac{1}{f}$$

معمولاً یک تلسکوپ را با قطر دهانه و نسبت کانونی آن مشخص می‌کنند. **نسبت کانونی** برابر است با نسبت فاصله‌ی کانونی به قطر دهانه‌ی تلسکوپ:

⁶ در حالت کلی اگر مرکز عدسی یا آینه در سمت مخالف نور فرودی باشد، علامت R مثبت است و بالعکس.

⁷ سی‌سی‌دی مانند فیلم عکاسی یک آشکارساز است. در بخش‌های بعدی به طور مفصل راجع به سی‌سی‌دی صحبت کرده‌ایم.

⁸ مساله‌ی 4

$$F = \frac{f}{D}$$

برای مثال فاصله‌ی کانونی تلسکوپی با قطر دهانه‌ی 20 سانتیمتر و نسبت کانونی 5 برابر با $20 \times 5 = 100$ سانتیمتر است. نسبت کانونی 5 را به صورت $f/5$ نشان می‌دهند.

قدرت جمع‌آوری نور تلسکوپ (J)، مقدار انرژی در واحد زمان در واحد سطح تصویر (برای تصویرهایی که تفکیک شده هستند) است. مقدار انرژی که وارد تلسکوپ می‌شود به مساحت دهانه‌ی تلسکوپ بستگی دارد. بنابراین: $J \propto D^2$. همچنین با توجه به مقیاس صفحه می‌توان فهمید که مساحت تصویر روی صفحه‌ی کانونی با f^2 متناسب است. بنابراین: $J \propto \frac{1}{f^2}$. در حالت کلی با ترکیب رابطه‌ی J با D و J با f می‌توان نوشت:

$$J \propto \frac{1}{F^2}$$

قدرت گردآوری نور با عکس مجذور نسبت کانونی متناسب است. البته معمولاً فقط تاثیر قطر دهانه‌ی تلسکوپ در قدرت گردآوری نور را در نظر می‌گیرند.

مثال: قدرت گردآوری نور یک تلسکوپ 60 سانتیمتری چند برابر چشم انسان است؟

کافیست نسبت مجذور دهانه‌ها را بدست آوریم. قطر مردمک چشم انسان به طور معمول بین 6 تا 8 میلیمتر در نظر گرفته می‌شود. بنابراین قدرت تفکیک تلسکوپ مورد نظر $10000 = \left(\frac{60}{0.6}\right)^2$ برابر چشم انسان است.

اهمیت قدرت گردآوری نور در مشاهده‌ی اجرام کم‌نور مشخص می‌شود. چشم ما برای دیدن یک ستاره باید یک حداقل انرژی از آن دریافت کند. تلسکوپ‌ها نور بیشتری از ستاره را جمع می‌کنند و وارد چشم ما می‌کنند. بدین ترتیب با استفاده از تلسکوپ اجرام کم‌نوری که با چشم غیرمسلح دیده نمی‌شوند را هم می‌توان دید. قدر کم‌نورترین ستاره‌ای که انسان می‌تواند ببیند، **قدر حدی** نام دارد. اگر قدر ستاره‌ای از قدر حدی بیشتر باشد، انسان قادر به دیدن آن نیست. قدر حدی چشم غیرمسلح در شرایط ایده‌آل رصدی تقریباً 6.5 است. بنا به استدلالی که در بالا ارائه شد، قدر حدی تلسکوپ از چشم غیرمسلح بیشتر است؛ یعنی ستاره‌های کم‌نورتر هم با تلسکوپ می‌توانند دیده شوند.

ستاره‌ای در نظر بگیرید که وقتی با چشم غیرمسلح رصد می‌شود، قدر آن m است. می‌خواهیم ببینیم قدر آن وقتی از پشت تلسکوپ دیده شود، m' چقدر خواهد بود؟

رابطه‌ی بین قدر و شار بدین صورت است:

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log\left(\frac{F_1}{F_2}\right)$$

اما شاری که ما از یک ستاره دریافت می‌کنیم در حالت رصد مسلح و غیرمسلح متفاوت است. پس باید آن را به طور دقیق‌تری بررسی کنیم. انرژی که از ستاره در واحد زمان از واحد سطح روی زمین می‌گذرد، روشنایی آن نامیده می‌شود.⁹ منظور ما از شار، انرژی است که در واحد زمان در واحد سطح چشم از ستاره دریافت می‌شود. بدیهی است که F که در فرمول بالا آورده شده است همان شار است. روشنایی را با b نشان می‌دهیم. با این تعاریف، روشنایی یک ستاره به اینکه با چه چیزی رصد شود بستگی ندارد. (همان فرمول معروف $b = \frac{L}{4\pi d^2}$) اما شار به ابزار رصدی مربوط است. در حالت رصد غیرمسلح، جمع‌آورنده‌ی نور مردمک چشم است. بنابراین انرژی‌ای که وارد چشم می‌شود برابر می‌شود با روشنایی ضربدر مساحت مردمک. این انرژی دوباره تقسیم بر مساحت مردمک چشم می‌شود و شار را به ما می‌دهد. در رصد مسلح، جمع‌آورنده‌ی نور دهانه‌ی تلسکوپ است. همه‌ی نوری که از ستاره وارد دهانه‌ی تلسکوپ می‌شود توسط چشمی به چشم ما هدایت می‌شود. پس این بار روشنایی باید در مساحت دهانه‌ی تلسکوپ ضرب و سپس به مساحت مردمک تقسیم شود تا شار بدست آید. بنابراین شار با مساحت جمع‌آورنده‌ی نور متناسب است. یعنی:

$$\frac{F}{F'} = \frac{A_e}{A_t} = \left(\frac{D_e}{D_t}\right)^2$$

که در آن D_t و D_e به ترتیب قطر مردمک چشم و قطر دهانه‌ی تلسکوپ و A مساحت متناظر با هر کدام می‌باشد. m قدر در رصد غیرمسلح و m' قدر در رصد مسلح است. حال با استفاده از رابطه‌ی قدر و شار می‌توان نوشت:

$$m' - m = -2.5 \log\left(\frac{F'}{F}\right) = -2.5 \log\left(\frac{D_t}{D_e}\right)^2$$

پس:

$$m' - m = -5 \log\left(\frac{D_t}{D_e}\right)$$

چون قطر دهانه‌ی تلسکوپ در هر حال از قطر مردمک چشم بیشتر است، سمت راست تساوی همیشه منفی است. یعنی قدری که از پشت تلسکوپ از ستاره می‌بینیم کمتر از حالتی است که با چشم غیرمسلح به رصد می‌پردازیم. این یعنی ستاره از پشت تلسکوپ پرنورتر دیده می‌شود که نتیجه‌ای کاملاً منطقی است.

⁹ روشنایی در واقع همان شار انرژی است! اما در اینجا چون می‌خواهیم تفاوت بین دو شاری که به واحد سطح زمین و به واحد سطح چشم ما می‌رسد را بررسی کنیم، بین شار و روشنایی تمایز قائل می‌شویم. منظور از شار و روشنایی در این متن دقیقاً همان چیزی است که گفته شده است. پس در مطالعه‌ی این متن تعاریف دیگر را دور بریزید! و هم چنین در مطالعات دیگر خود تعاریف و نوتاسیون این متن را دور بریزید!

حالا که فهمیدیم از پشت تلسکوپ می‌توانیم ستاره‌هایی که کم‌نورتر هستند را هم ببینیم، این سوال پیش می‌آید که قدر حدی تلسکوپ چقدر است؟ بنظر می‌رسد به راحتی با استفاده از رابطه‌ای که در بالا بدست آوردیم می‌توان رابطه‌ای هم برای قدر حدی تلسکوپ بدست آورد. کم‌نورترین ستاره‌ای که از پشت تلسکوپ می‌بینیم، ستاره‌ایست که قدر مسلح (m') آن همان قدر حدی چشم است. چیزی که از آن به عنوان قدر حدی تلسکوپ یاد می‌شود، قدر ستاره‌ی مذکور در رصد غیر مسلح است. به زبان ریاضی:

$$m' = m_e$$

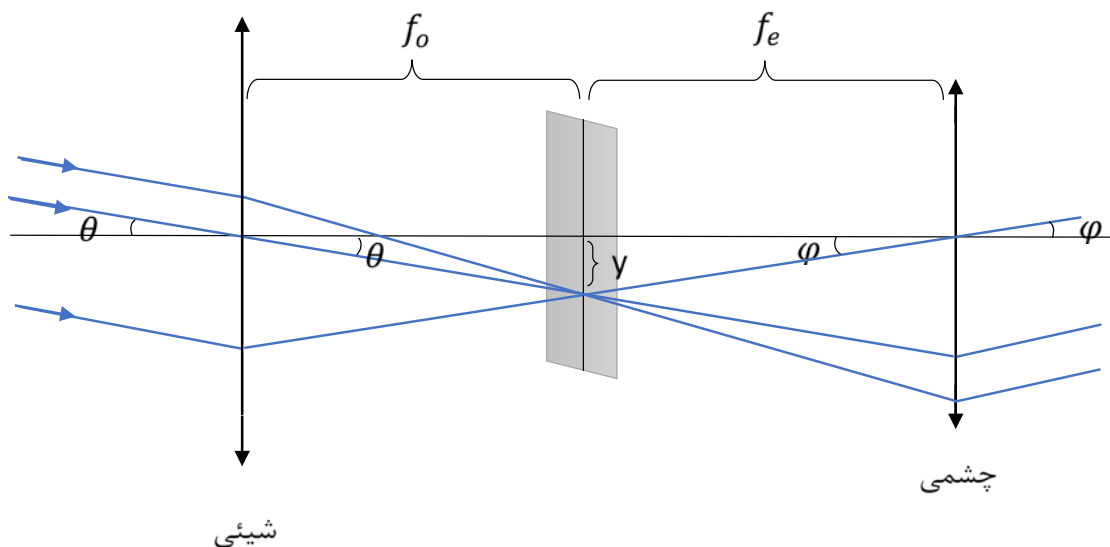
$$m = m_t$$

m_e و m_t به ترتیب قدر حدی چشم غیر مسلح و قدر حدی تلسکوپ هستند. با استفاده از رابطه‌ای که بدست آورده بودیم، فرمول قدر حدی تلسکوپ بدست می‌آید:

$$m_t - m_e = 5 \log \left(\frac{D_t}{D_e} \right)$$

به تفاوت این رابطه با رابطه‌ی قبلی دقت کنید. برای اینکه بخاطر مثبت و منفی زیاد گیج نشوید، می‌توانید با استدلال بفهمید که علامتی که پشت 5 می‌آید مثبت است یا منفی. علامت باید به گونه‌ای باشد که قدر حدی تلسکوپ بیشتر از قدر حدی چشم شود. هم‌چنین برای قدر ستاره از پشت تلسکوپ، این قدر باید کمتر از قدر ستاره با چشم غیر مسلح باشد.

یکی دیگر از کارهایی که تلسکوپ انجام می‌دهد، بزرگنمایی است. **بزرگنمایی**، نسبت زاویه‌ی بین تصاویر دو شیء به زاویه‌ی واقعی بین آن‌هاست. اکنون رابطه‌ای برای بزرگنمایی تلسکوپ اثبات می‌کنیم.



در شکل بالا سه پرتو به عنوان نمونه از پرتوهایی که از منبعی که با محور اصلی تلسکوپ زاویه θ می‌سازند، رسم شده‌اند. عدسی شیئی در سمت چپ و عدسی چشمی در سمت راست رسم شده‌اند. صفحه‌ی کانونی نیز

رسم شده است. دقت کنید که صفحه‌ی کانونی صرفاً یک صفحه‌ی فرضی است و در حالتی که از چشمی استفاده می‌کنیم، هیچ چیزی آنجا نیست. پرتوها پس از کانونی شدن توسط شیئی، با عبور از چشمی دوباره موازی می‌شوند و به چشم ما وارد می‌شوند. اما زاویه‌ای که پرتوهای خروجی با محور اصلی می‌سازند، متفاوت است. این زاویه را φ می‌نامیم. بنابراین بزرگنمایی برابر می‌شود با:

$$m = \frac{\varphi}{\theta}$$

با توجه به شکل: (البته شکل پر از اغراق است!)

$$y = f_o \tan \theta = f_e \tan \varphi$$

با تقریب زوایای کوچک، برای بزرگنمایی بدست می‌آوریم:

$$m = \frac{f_o}{f_e}$$

این رابطه بزرگنمایی را بر حسب فواصل کانونی شیئی و چشمی به راحتی به دست می‌دهد.



میدان دید (FOV)¹⁰، قطر زاویه‌ای بخشی از آسمان است که در یک سیستم نوری مشاهده می‌شود. میدان دیدی که از پشت چشمی مشاهده می‌شود، بسته به بزرگنمایی تلسکوپ مورد استفاده، می‌تواند تغییر کند. به این خاطر عموماً دو مفهوم هست که از آن‌ها به عنوان میدان دید نام برده می‌شود:

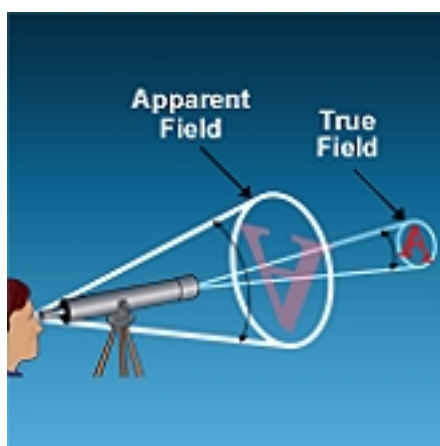
- 1- میدان دید واقعی: اندازه زاویه‌ای پهنه‌ای از آسمان که با استفاده از تلسکوپی با بزرگنمایی مشخص، در چشمی دیده می‌شود.
- 2- میدان دید ظاهری: اندازه زاویه‌ای تصویری که با چشمی دیده می‌شود. یعنی اینکه تصویر درون چشمی چقدر بزرگ "بنظر می‌رسد". میدان دید ظاهری برای هر چشمی با فاصله‌ی کانونی مشخص، ثابت است.

بگذارید این تعاریف را کمی باز کنیم. میدان دید ظاهری، در واقع اندازه زاویه‌ای مقداری از آسمان است که اگر با چشمی تنها به آسمان نگاه کنیم، درون چشمی دیده می‌شود. این همان زاویه‌ایست که ما وقتی چشمی را به تلسکوپ وصل کرده و به آسمان نگاه می‌کنیم، تصویر درون چشمی را با آن زاویه می‌بینیم. این زاویه از اندازه‌ی واقعی چیزی که در چشمی دیده می‌شود بزرگتر است. مثلاً فرض کنید چشمی را به تلسکوپ متصل

⁸ FOV مخفف عبارت انگلیسی *Field Of View* است.

کرده و به سمت یک سحابی خاص نشانه می‌رویم بطوری که سحابی کل میدان دید چشمی را بپوشاند. یعنی اگر درون چشمی نگاه کنیم، لبه‌های تصویری که می‌بینیم بر لبه‌های سحابی منطبق باشد. در اثبات رابطه‌ی بزرگنمایی دیدیم که اندازه زاویه‌ای که ما پشت چشمی از سحابی "می‌بینیم" با اندازه زاویه‌ای واقعی سحابی متفاوت است. میدان دید ظاهری در این مثال، همان اندازه زاویه‌ای است که از سحابی "می‌بینیم" و میدان دید واقعی اندازه زاویه‌ای واقعی‌ست که سحابی در آسمان اشغال می‌کند. بنابراین اگر میدان دید واقعی را FOV و میدان دید ظاهری را FOV' بنامیم، به ترتیب با 2θ و 2φ در شکل قبل متناظر خواهند بود. پس داریم:

$$FOV = \frac{FOV'}{m}$$



در مثالی که زدیم اگر اندازه زاویه‌ای سحابی 0.05 درجه و بزرگنمایی تلسکوپ 10 باشد، FOV همان 0.05 درجه اما $FOV' = 0.5$ درجه است. یعنی وقتی از پشت چشمی تلسکوپ به سحابی نگاه می‌کنیم سحابی را به همان اندازه‌ای می‌بینیم که یک ماه کامل وقتی با چشم غیرمسلح به ماه نگاه کنیم، به آن اندازه دیده می‌شود. (قطر ماه کامل 0.5 درجه است.)

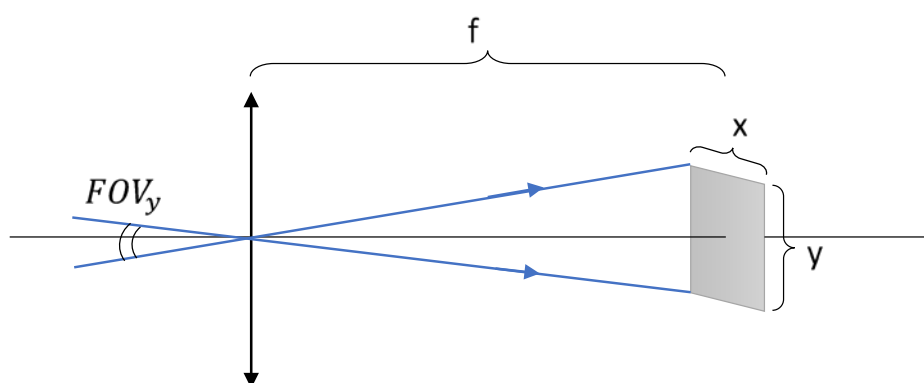


تصویر سمت راست و تصویر وسط میدان دید ظاهری یکسانی دارند، اما میدان دید واقعی تصویر وسط بزرگ‌تر و بزرگنمایی آن کمتر است. تصویر سمت چپ، میدان دید واقعی به اندازه تصویر سمت راست دارد، اما میدان دید ظاهری و بزرگنمایی آن کوچک‌تر است.

در اینجا خوب است روابطی را برای میدان دید اثبات کنیم. محدودکننده‌ی میدان دید تلسکوپ می‌تواند ابعاد فیلم عکاسی یا سی‌سی‌دی باشد. حتی ابعاد لوله‌ی تلسکوپ و یا چشمی هم ممکن است میدان دید را محدود کنند.

ابتدا حالتی را بررسی می‌کنیم که ابعاد فیلم یا سی‌سی‌دی محدودکننده‌ی میدان دید است. در این حالت زاویه‌ی میدان دید در راستاهای متفاوت می‌تواند متفاوت باشد. با توجه به شکل زیر:

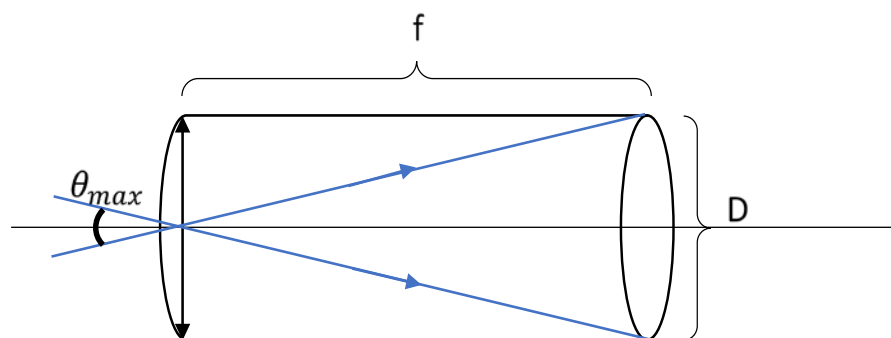
$$\tan\left(\frac{FOV_y}{2}\right) = \frac{y/2}{f}$$



و به همین ترتیب:

$$\tan\left(\frac{FOV_x}{2}\right) = \frac{x/2}{f}$$

اگر محدود کننده‌ی میدان دید ابعاد لوله‌ی تلسکوپ باشد، آنگاه با توجه به شکل زیر:



$$\tan\left(\frac{\theta_{max}}{2}\right) = \frac{D/2}{f}$$



اگر زاویه‌ی نقطه‌ای از آسمان از محور تلسکوپ بیش از $\frac{\theta_{max}}{2}$ باشد، نور آن نقطه نمی‌تواند از انتهای لوله‌ی تلسکوپ خارج شود و بنابراین قابل مشاهده نخواهد بود. این یعنی حداکثر زاویه‌ای که می‌توان با تلسکوپ دید θ_{max} است. اگر θ_{max} کوچکتر از FOV باشد، اطراف تصویری که در چشمی مشاهده می‌شود، تاریک دیده خواهد شد. (شکل روبرو) اما این اصلاً مطلوب نیست. بنابراین هیچوقت برای تلسکوپ از چنین چشمی استفاده نمی‌کنند؛ بلکه از چشمی‌هایی استفاده می‌کنند که FOV آنها کوچکتر یا مساوی θ_{max} باشد.

لازم به ذکر است گاهی اوقات منظور از میدان دید (چه واقعی و چه ظاهری) قطر زاویه‌ای ناحیه‌ی قابل مشاهده نیست، بلکه منظور مساحت آن ناحیه است. با یک مثال بحث میدان دید را به پایان می‌بریم.

مثال: یک سی‌سی‌دی 400×600 پیکسل داریم که ابعاد هر پیکسل آن 0.5 میکرومتر است. این سی‌سی‌دی را در صفحه‌ی کانونی تلسکوپی با فاصله‌ی کانونی 1.5 متر قرار می‌دهیم. میدان دید سی‌سی‌دی چند ثانیه‌قوسی مربع است؟¹¹

در اینجا میدان دید بر حسب ثانیه قوسی مربع خواسته شده است، بنابراین می‌فهمیم منظور مساحت ناحیه است و نه قطر زاویه‌ای آن.

$$\frac{FOV_y}{2} \approx \tan \frac{FOV_y}{2} = \frac{y/2}{f}$$

$$\frac{FOV_x}{2} \approx \tan \frac{FOV_x}{2} = \frac{x/2}{f}$$

در حالت کلی، چون ناحیه‌ی مورد نظر از آسمان روی کره‌ی سماوی است، برای محاسبه‌ی مساحت باید از هندسه و مثلثات کروی بهره بگیریم اما در اینجا چون زوایا کوچک هستند، می‌توانیم با تقریب از هندسه‌ی مسطحه استفاده کنیم.

$$S_{FOV} \approx FOV_x \times FOV_y$$

$$S_{FOV} \approx 1134 \text{ } ^\circ 2$$

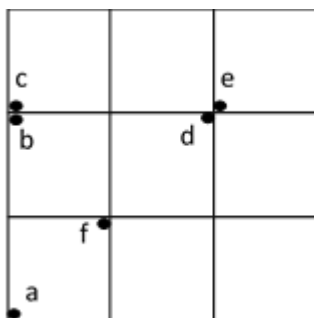
¹¹ برگرفته از آزمون آزمایشی مرحله اول نهمین تیم المپیاد جهانی نجوم

قدرت تفکیک

دو منبع نقطه‌ای در نظر بگیرید که در حالی که به آنها نگاه می‌کنیم، یک نفر آن دو را به یکدیگر نزدیک می‌کند. با نزدیک کردن آن‌ها فاصله‌ی زاویه‌ای‌شان کاهش می‌یابد و در نهایت ما تنها یک نقطه‌ی پرنور مشاهده می‌کنیم. یعنی هر دو منبع را یکی می‌بینیم. در این صورت چشم ما دیگر قادر به تفکیک آن‌ها نیست. به کوچک‌ترین فاصله زاویه‌ای که دو منبع نقطه‌ای با آن فاصله می‌توانند تفکیک شوند، **قدرت تفکیک** می‌گویند. هر ابزار دیداری مانند چشم، دوربین عکاسی، تلسکوپ و ... یک قدرت تفکیک محدود دارد. هرچه "زاویه‌ی تفکیک" کوچک‌تر باشد، قدرت تفکیک "بهتر" است و هر چه این زاویه "بزرگ‌تر" باشد، قدرت تفکیک "بدتر" خواهد بود. البته معمولاً به طور گیج‌کننده‌ای واژه‌های قدرت و زاویه‌ی تفکیک را بجای یکدیگر به کار می‌برند! عوامل متفاوتی وجود دارند که موجب محدودیت قدرت تفکیک می‌شوند. در اینجا به 2 مورد اشاره می‌کنیم و در بخش اثرهای جوی نیز یک عامل موثر دیگر را مورد بررسی قرار خواهیم داد.

قدرت تفکیک ناشی از اندازه‌ی پیکسل‌ها:

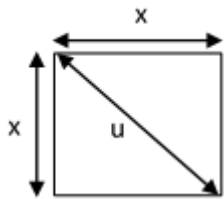
از آنجایی که هر آشکارسازی اندازه و قطر پیکسل غیر صفر دارد، با توجه به معادله‌ای که برای مقیاس صفحه بدست آوردیم ($\theta = \frac{l}{f}$)، یک محدودیت برای قدرت تفکیک زاویه‌ای ایجاد می‌شود. البته این قدرت تفکیک به جهت خط واصل دو منبع نسبت به پیکسل‌ها و محل تصویر منابع روی پیکسل‌ها بستگی دارد. شکل زیر را در نظر بگیرید. این شکل یک صفحه سی‌سی‌دی 3×3 را نشان می‌دهد. نقاط مشکی تصاویر منابع نقطه‌ای a, b, c, d, e, f روی سی‌سی‌دی هستند. دقت کنید که سی‌سی‌دی فقط تعداد فوتون‌های دریافتی در هر پیکسل را می‌تواند بشمارد و نمی‌تواند تعیین کند که این فوتون‌ها به کدام قسمت از آن پیکسل خاص خورده‌اند. بنابراین در شکل روبرو a و f غیر قابل تفکیک هستند. همچنین a و b با اینکه به دو پیکسل متفاوت خورده‌اند اما قابل تفکیک نیستند؛ چون ما



نمی‌توانیم تشخیص دهیم که آیا این دو از یک منبع به ما رسیده‌اند و به دو پیکسل متفاوت خورده‌اند یا اینکه از دو منبع بسیار نزدیک به ما رسیده‌اند. با همین استدلال در می‌یابیم منبع a فقط می‌تواند از منابع c و e تفکیک شود و از سایر منابع قابل تفکیک نیست. حد بالای زاویه‌ی تفکیک فاصله زاویه‌ای a و e یعنی فاصله زاویه‌ای متناظر با دو برابر قطر پیکسل است. اما همان‌طور که گفتیم قدرت تفکیک به جهت خط واصل منابع نسبت به پیکسل‌ها بستگی دارد. مثلاً فاصله‌ی c و a کمتر از دو برابر قطر پیکسل است اما آن‌ها قابل تفکیک‌اند. بدترین حالت وقتی اتفاق می‌افتد که دو منبع در راستای قطر پیکسل قرار بگیرند یعنی مانند a و e . بنابراین هر دو منبعی که فاصله‌شان بیشتر از دو برابر قطر پیکسل‌ها باشد، صرف‌نظر از جهت‌گیری‌شان قابل تفکیک هستند اما اگر فاصله‌شان کمتر از این مقدار باشد، بسته به جهت‌گیری‌شان و همچنین اینکه تصویرشان کجای

پیکسل‌ها می‌افتد ممکن است تفکیک شوند و یا تفکیک نشوند. مثلاً e و f همراستا با d و a هستند اما با وجود اینکه فاصله‌ی زوج اول کمتر از زوج دوم است، زوج اول تفکیک‌پذیر و زوج دوم تفکیک‌ناپذیرند.

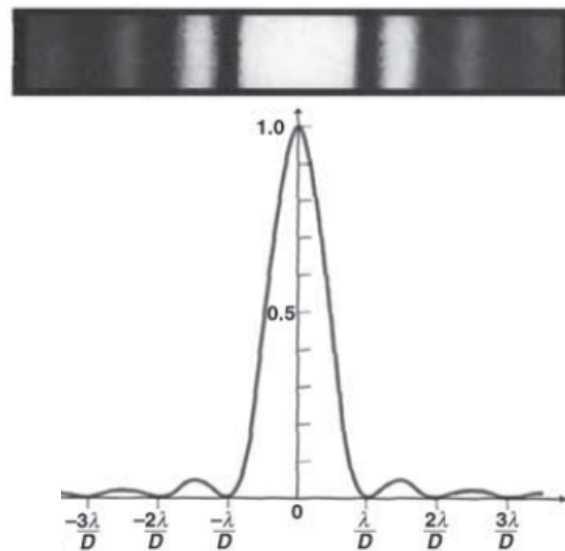
اگر پیکسل‌ها مربع‌هایی با ابعاد x باشند، حد بالای زاویه‌ی تفکیک را می‌توان این‌گونه به راحتی بدست آورد:¹²



$$\theta_{max} = \frac{2u}{f} = \frac{2\sqrt{2}x}{f} \approx 3 \frac{x}{f}$$

قدرت تفکیک در اثر پراش:

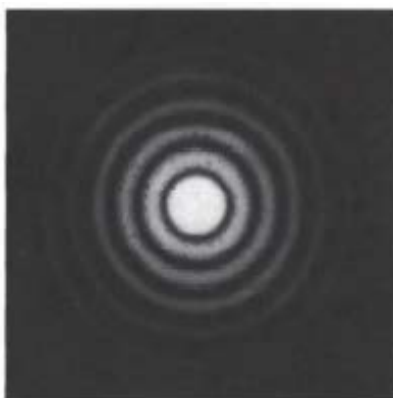
متأسفانه قدرت تفکیک کردن دو منبع با فاصله زاویه‌ای کوچک θ فقط مساله‌ی بزرگ‌تر کردن فاصله‌ی کانونی و یا کم کردن ابعاد پیکسل‌ها نیست. یک محدودیت اساسی بخاطر پراش برای تفکیک این منابع وجود دارد. این چیزی شبیه به آزمایش پراش تک شکاف است. دهانه‌ی تلسکوپ مانند سدی جلوی ورود بخش‌های دیگر نور را می‌گیرد. امواجی که از دهانه وارد می‌شوند، با یکدیگر تداخل می‌کنند و طرح پراش ایجاد می‌شود. نوری که از یک شکاف باریک با طول D عبور کند، طرحی مانند شکل زیر روی آشکارساز یا پرده ایجاد می‌کند. شکل دوم، نسبت شدت نور به ماکسیمم شدت بر حسب فاصله زاویه‌ای از مرکز را نشان می‌دهد.



در تلسکوپ بخاطر تقارن، طرح پراش به صورت دایره هم‌مرکز ظاهر می‌شود. (شکل زیر) دایره‌ی روشن مرکزی به نام دانشمند انگلیسی سر جورج آیری، **قرص آیری** نامیده می‌شود. اگر نور به دهانه به صورت همگن تابش

¹² اگر این نکته را در نظر بگیریم که طرح پراش ستاره‌ها و منابع نقطه‌ای متقارن است، سیگنال در دو پیکسل که به صورت قطری در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند، حتماً نشان‌دهنده‌ی دو منبع مجزا خواهد بود؛ زیرا اگر یک منبع در بین آن دو پیکسل وجود می‌داشت، طرح پراش آن علاوه بر دو پیکسل مذکور، دو پیکسل قطری دیگر را هم در بر می‌گرفت. بدین ترتیب قدرت تفکیک برابر با دو برابر ضلع یک پیکسل می‌شود.

شود، 84 درصد کل توان تابشی درون ناحیه‌ی قرص آیری می‌افتد. اولین حلقه‌ی روشن 8.6 درصد توان تابشی را شامل می‌شود و همین طور با دور شدن از مرکز، توان حلقه‌ها کاهش می‌یابد. بنابراین از یک منبع نقطه‌ای در آسمان، یک تصویر نقطه‌ای روی آشکارساز تشکیل نمی‌شود، بلکه یک طرح پراش به شکلی که شرح داده شد تشکیل می‌شود.



حال اگر دو منبع نقطه‌ای نزدیک به هم داشته باشیم، طرح پراش آن‌ها روی یکدیگر می‌افتد. اگر این دو منبع خیلی به هم نزدیک باشند، دیگر نمی‌توان حلقه‌های پراش آن‌ها را به طور جداگانه تشخیص داد و دو منبع تفکیک نمی‌شوند. باید برای مرز تفکیک‌پذیری و تفکیک‌ناپذیری معیاری قائل شد. یک معیار اختیاری، **معیار ریلی** است که دو تصویر را در صورتی در حد تفکیک‌پذیری و تفکیک‌ناپذیری می‌داند که پیک مرکزی یکی از طرح‌های پراش، روی اولین مینیمم (وسط اولین حلقه‌ی تاریک) طرح دیگر بیفتد. (شکل صفحه بعد) با این معیار قدرت تفکیک ناشی از پراش یک تلسکوپ با دهانه‌ی دایره‌ای از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

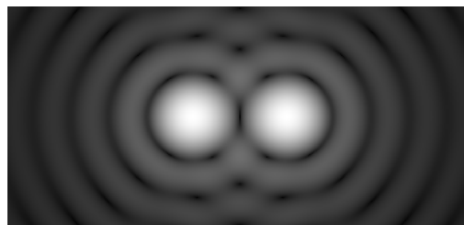
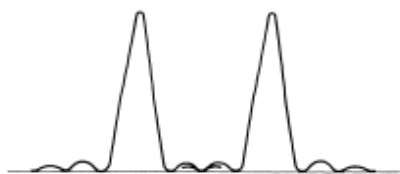
در رابطه‌ی بالا D قطر دهانه‌ی تلسکوپ و λ طول موج نور است.

این قدرت تفکیک برخلاف قدرت تفکیکی که ناشی از اندازه‌ی پیکسل‌ها بود، برای همه‌ی نواحی تصویر و صرف‌نظر از جهت خط واصل دو منبع مورد نظر، یکسان است.

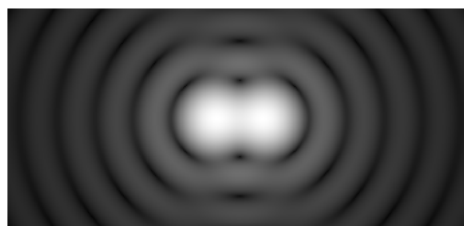
هرچه قطر دهانه‌ی تلسکوپ بیشتر باشد و در طول موج‌های کوتاه‌تری رصد کنیم، قدرت تفکیک بهتر می‌شود. برای بهبود قدرت تفکیک در طول موج‌های بلند رادیویی از تکنیک‌هایی مانند تداخل‌سنجی¹³ استفاده می‌شود.

¹³ در بخش‌های بعدی تداخل‌سنجی و اثر آن بر بهبود قدرت تفکیک را مورد بررسی قرار داده‌ایم.

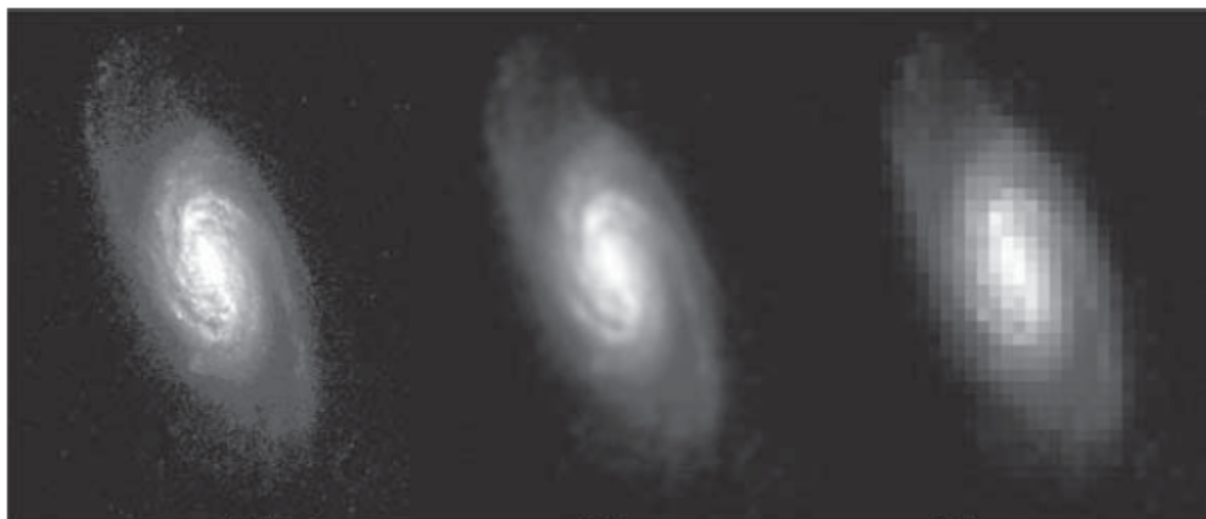
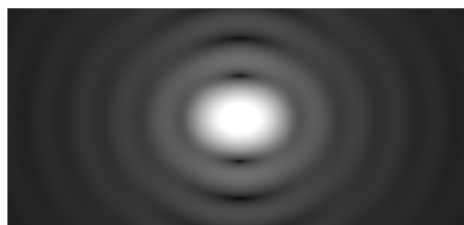
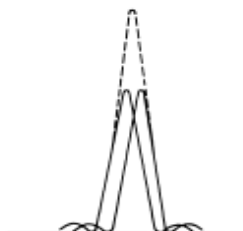
تفکیک پذیر



معیار ریلی



تفکیک ناپذیر



نمایی از قدرت تفکیک برای کهکشان NGC2903

تصویر سمت چپ یک تصویر با قدرت تفکیک زیاد مانند هنگام استفاده از یک تلسکوپ با دهانه بزرگ است.

تصویر وسط یک تصویر با قدرت تفکیک کم به خاطر استفاده از تلسکوپ با دهانه‌ی کوچک یا پارامتر دید نامناسب است.

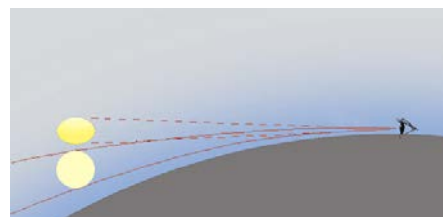
تصویر سمت راست یک تصویر با قدرت تفکیک کم به خاطر پیکسل‌های بزرگ آشکارساز است.

اثرهای جو

هر رصدی که از سطح زمین انجام بگیرد، تحت تاثیر جو قرار می‌گیرد. اتمسفر نه تنها با پراکنده کردن، جذب و تابش نور، سیگنال‌های ورودی را تغییر می‌دهد، بلکه تاثیراتش بر سیگنال‌ها به شدت به طول موج بستگی دارد و با زمان و مکان هم تغییر می‌کند. جو تقریباً جلوی بیشتر طیف الکترومغناطیس را می‌گیرد و تنها به طول موج‌های ناحیه‌ی مرئی و رادیویی نور اجازه می‌دهد به سطح زمین برسند. جو اثر خاصی روی امواج رادیویی نمی‌گذارد اما تاثیرش روی نور مرئی قابل توجه است. برای کاهش آثار جوی سعی می‌کنند رصدخانه‌ها را در ارتفاعات بسازند. اکنون می‌خواهیم آثار نامطلوب جو بر رصد اجرام سماوی را بررسی کنیم.

شکست جوی

شکست نور وقتی از یک محیط به محیط دیگر وارد می‌شود با قانون اسنل¹⁴ توصیف می‌شود. یک چنین شکستی وقتی نور از فضا وارد جو می‌شود و از لایه‌های چگال و چگال‌تر جوی عبور می‌کند، اتفاق می‌افتد. میزان شکست با افزایش زاویه‌ی سمت‌الراسی (زاویه‌ی بین منبع و سمت‌الراس) افزایش می‌یابد و باعث می‌شود منبع در مکانی بالاتر از مکان واقعی‌اش دیده شود. به همین دلیل تصویر اجسام گسترده که بازه‌ای از زوایای سمت‌الراسی را شامل می‌شوند، دچار انحراف و اعوجاج می‌شود. مثل خورشید در هنگام طلوع یا غروب که کمی تخت شده به نظر می‌رسد. (شکل‌های زیر)



با نوشتن متوالی قانون اسنل برای لایه‌های مجاور جو که بتوان ضریب شکست را در هر لایه ثابت در نظر گرفت و با تقریب جو تخت، رابطه‌ی بین زاویه‌ی سمت‌الراسی واقعی Z_0 و زاویه‌ی سمت‌الراسی مشاهده شده Z_t بدست می‌آید:

$$\sin z_0 = n \sin z_t$$

که در آن n ضریب شکست نور در سطح زمین است.¹⁵

¹⁴ به پیوست 1 رجوع کنید.

¹⁵ برای بحث مفصل راجع به این موضوع می‌توانید به فصل 3 کتاب نجوم کروی نوشته اسمارت مراجعه کنید.

پارامتر دید

متاسفانه نمی‌توان با افزایش قطر شیئی تلسکوپ، قدرت تفکیک تلسکوپ‌های زمینی را به طور نامحدودی افزایش داد. این بخاطر تلاطم‌ها و اعوجاجات جو است. این اعوجاجات می‌توانند با "سلول"های گازی که مدام در جهت‌های کاتوره‌ای حرکت می‌کنند، نمایش داده شوند. تعداد زیادی از این سلول‌ها با ابعاد و دماهای اندک متفاوتی ممکن است بالای دهانه‌ی تلسکوپ حضور داشته باشند. یک تقریب خوب برای تلاطم‌های جوی این است که فشار ثابت می‌ماند اما دما افت‌وخیز پیدا می‌کند که موجب افت‌وخیز در ضریب شکست نور می‌شود. می‌توان در هر یک از این سلول‌ها از تغییرات ضریب شکست نور صرف‌نظر کرد اما ضریب شکست از یک سلول به سلول دیگر تغییر می‌کند. نتیجه‌ی خالص این است که جبهه‌های موجی که در ابتدا موازی بوده‌اند، دچار اعوجاج می‌شوند و تصویر در نقطه‌ای کمی آن‌طرف‌تر از تصویری که در نبود اعوجاج تشکیل می‌شد، ثبت می‌شود. اگر چندین سلول بالای دهانه حضور داشته باشند، چندین تصویر منحرف شده (که هر کدام دچار طرح پراش تلسکوپ هم شده است) روی آشکارساز تشکیل می‌شود. هر تصویر یک لکه نامیده می‌شود. هرچه دهانه‌ی تلسکوپ بزرگ‌تر باشد، سلول‌های بیشتری جلوی آن قرار می‌گیرند و لکه‌های بیشتری روی آشکارساز می‌افتند. بیشترین تأثیرات مربوط به سلول‌های نزدیک زمین است که توسط باد جلوی دهانه جابجا می‌شوند. ابعاد این سلول‌های اتمسفری را با **پارامتر فرید**¹⁶ بیان می‌کنند. پارامتر فرید تغییر می‌کند اما مقدار معمول آن تقریباً $r_0 = 10 \text{ cm}$ است. در ارتفاعات بالا که جو کمتر متلاطم است، پارامتر فرید تا 20 cm هم افزایش می‌یابد.

چون سلول‌های جوی همواره در حال حرکت هستند، طرح لکه‌ها روی آشکارساز سریعاً با زمان تغییر می‌کند. مقیاس زمانی که در طی آن تغییرات قابل توجهی در طرح لکه‌ها ایجاد شود از مرتبه‌ی زمانی است که طول می‌کشد تا سلول‌ها از جلوی دهانه عبور کنند؛ یعنی:

$$t_0 \approx \frac{r_0}{v}$$

در این رابطه v سرعت حرکت سلول‌های جو یا همان سرعت باد است. برای بادی با سرعت 5 ms^{-1} و پارامتر فرید 10 cm این مقیاس زمانی تنها 20 ms می‌شود. بنابراین اگر بخواهیم تصاویری تشکیل دهیم که تنها در اثر پراش محدود شده باشند، باید زمان نوردهی کمتر از 20 ms باشد. مشکلی که این امر ایجاد می‌کند این است که نوردهی کمتر از 20 ms آنقدر کوتاه است که تنها تصویر ستاره‌های پرنور می‌تواند روی آشکارساز ثبت شود.

برای اینکه آشکارساز بتواند از منابع کم نور سیگنال ثبت کند، زمان نوردهی بسیار طولانی‌تر از 20 ms مورد نیاز است. در مدت نوردهی، لکه‌های جابجا شده روی آشکارساز ثبت می‌شوند و جاهای خالی را پر

¹⁶ Fried parameter

می‌کنند. در نهایت یک تصویر پخش شده از منبع نقطه‌ای تشکیل می‌شود. اندازه زاویه‌ای مشخصه‌ی این ناحیه (که $FWHM^{17}$ آن است؛ یعنی فاصله زاویه‌ای مرکز تا جایی که در آن، شدت نصف مقدار ماکزیمم است)، **پارامتر دید (seeing)** نامیده می‌شود. یعنی پارامتر دید تقریباً زاویه‌ی معادل با شعاع تصویر دایره‌ای تشکیل شده از منابع نقطه‌ای (مثل ستاره‌ها) است. مکان ظاهری ستاره در آسمان، وسط قرص دید آن است. پارامتر دید با طول موج، مکان جغرافیایی و زمان تغییر می‌کند. یکی از مکان‌هایی که بهترین پارامتر دید را دارد، رصدخانه‌ی موناکی است که پارامتر دید آن به طور معمول 0.5 یا 0.6 ثانیه قوسی است.

واضح است که اگر دو ستاره آن قدر به هم نزدیک باشند که قرص دید آن‌ها روی یکدیگر بیفتد، برای ما قابل تفکیک نخواهند بود. بنابراین قدرت تفکیک تلسکوپ‌های بزرگ زمینی نه بخاطر پراش که بخاطر پارامتر دید محدود می‌شود. پارامتر دید از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\theta = 1.22 \frac{\lambda}{r_0}$$

در واقع دهانه‌ی موثر یک تلسکوپ در صورتی که قدرت تفکیک آن در اثر پارامتر دید محدود شده باشد، ابعاد سلول‌های جوی (پارامتر فرید) است و نه ابعاد دهانه‌ی شیئی. اگر پارامتر فرید 10 cm باشد، یک تلسکوپ یک متری همان قدرت تفکیکی را خواهد داشت که یک تلسکوپ 10 سانتیمتری دارد. برای تلسکوپ‌های کوچک‌تر از 10 cm قدرت تفکیک در اثر پراش محدود شده اما برای تلسکوپ‌های بزرگ‌تر عامل محدودکننده‌ی قدرت تفکیک، پارامتر دید است. البته بسته به ابعاد پیکسل‌های سی‌سی‌دی، قدرت تفکیک ممکن است بخاطر ابعاد پیکسل‌ها هم محدود شده باشد.

سوالی که در اینجا ممکن است پیش بیاید این است که اگر پارامتر دید قدرت تفکیک تلسکوپ‌ها را محدود می‌کند، دلیل ساخت این همه تلسکوپ بزرگ چیست وقتی آن‌ها نمی‌توانند بهتر از تلسکوپ‌های کوچک تفکیک کنند؟ پاسخ این است که همه چیز قدرت تفکیک نیست! تلسکوپ‌های بزرگ، نور بیشتری را از منابع جمع‌آوری می‌کنند و بنابراین می‌توانند تصویر منابع کم‌نورتر را هم ثبت کنند.

یکی از روش‌های غلبه بر مشکل پارامتر دید، استفاده از تلسکوپ‌های فضایی است که البته بسیار هزینه‌بر است. روش دیگر این است که رصدخانه را به گونه‌ای بسازیم که اختلافات دمایی را به حداقل برساند. البته تکنیک‌های تازه‌ای مانند اپتیک تطبیقی روی کار آمده‌اند که به کمک آن‌ها می‌توان به طور موثری بر اعوجاجات جوی غالب شد و قدرت تفکیک را بهبود داد.

Full Width at Half Maximum ¹⁷

چشمک زدن

هر کودکی می‌داند که ستاره‌ها چشمک می‌زنند! منظور آن‌ها از چشمک زدن همان سوسو زدن نور ستاره است. اما از نظر علمی به تغییرات سریع زمانی در روشنایی یک ستاره اطلاق می‌شود. عامل چشمک زدن ستاره‌ها هم مانند پارامتر دید، تلاطم‌های جوی است. البته چشمک زدن بخاطر خمیده شدن جبهه‌های موجی اتفاق می‌افتد نه انحراف مسیر نور و بنابراین بیشترین تاثیر روی آن ناشی از سلول‌هایی است که در لایه‌های بالایی جو قرار دارند. مقیاس زمانی چشمک زدن بیشتر از مرتبه‌ی میلی ثانیه است. افت‌وخیزهای روشنایی پیرامون یک مقدار میانگین خواهند بود که مقدار مطلوب برای اندازه‌گیری است. چون بیشتر مواقع مدت نوردهی از مقیاس زمانی چشمک زدن طولانی‌تر است، چشمک زدن ستاره‌ها برای بیشتر اندازه‌گیری‌های نجومی مشکلی ایجاد نمی‌کند.

وقتی از درون جو به یک ستاره یا هر منبع نقطه‌ای دیگری نگاه شود، می‌توان با چشم افت‌وخیزهای روشنایی آن را دید. یک منبع گسترده را می‌توان مجموعه‌ای از منابع نقطه‌ای با روشنایی‌های متفاوت در نظر گرفت که هر منبع نقطه‌ای قرص دید مخصوص به خود را دارد و هر قرص دید در حال چشمک زدن است. اگر چشم ما می‌توانست هر کدام از این منابع نقطه‌ای را تفکیک کند، افت‌وخیزهای روشنایی را در نقاط مختلف جسم می‌دید. اما قدرت تفکیک چشم انسان ($\approx 1'$) خیلی ضعیف‌تر از پارامتر دید ($1'' \approx$) است. بنابراین با چشم انسان، هر یک از افت‌وخیزهای روی جسم (بعضی مثبت و بعضی منفی حول یک مقدار میانگین) به تنهایی دیده نمی‌شود، بلکه چشم مجموع آن‌ها را می‌بیند و بنابراین اجسام گسترده را چشمک‌زن نمی‌بیند. آن جمله که می‌گوید "ستاره‌ها چشمک می‌زنند و سیارات می‌درخشند" راست می‌گوید! البته استثناء هم ممکن است رخ دهد.¹⁸

قرمززدگی

قرمززدگی نتیجه‌ای از این حقیقت است که جذب و پراکندگی نور به طول موج بستگی دارند. طول موج‌های کوچک‌تر (آبی‌تر) بیشتر از طول موج‌های بلندتر (قرمزتر) از خط دید به اطراف پراکنده می‌شوند. (دلیل آبی‌رنگ دیده شدن آسمان هم همین پدیده است) بنابراین وقتی از درون جو نگاه کنیم، طول موج‌های قرمز شدت بیشتری (نسبت به حالت نبود جو) خواهند داشت. پدیده قرمززدگی در نزدیکی افق شدیدتر است؛ چون نوری که در راستای افق دیده می‌شود مسیر بیشتری را در جو پیموده است. این موضوع در غروب خورشید کاملاً مشهود است.

اپتیک تطبیقی

اپتیک تطبیقی یک تکنیک برای بهبود پارامتر دید و خنثی کردن اعوجاجات جوی با استفاده از تغییر شکل‌های سریع آینه است. سیگنالی که از منبع مورد نظر دریافت می‌شود به همراه یک سیگنال مرجع از یک منبع نقطه‌ای که به اندازه‌ی کافی به منبع مورد نظر نزدیک باشد، پس از عبور از جو وارد تلسکوپ می‌شود. سپس این نور به دو پرتو تقسیم می‌شود که یک پرتو به سمت آشکارساز و پرتو دیگر به سمت یک دستگاه تحلیل‌گر می‌رود. تحلیل‌گر با تحلیل نور رسیده تغییراتی که در تصویر سیگنال مرجع در اثر اعوجاجات جوی ایجاد شده است را بررسی می‌کند و با توجه به آن‌ها به محرک‌های پشت آینه دستور می‌دهد که آینه را به گونه‌ای تغییر شکل دهند که این آثار را خنثی کند. چون سیگنال منبع به سیگنال مرجع نزدیک است، با این کار تصویر رسیده از سیگنال مورد نظر نیز تصحیح می‌شود. به این ترتیب می‌توان تا زمانی از مرتبه t_0 بدون تغییر شکل آینه به تصویربرداری پرداخت. پس از گذشت مدت زمانی از مرتبه t_0 سلول‌های بالای تلسکوپ تغییر مکان داده‌اند و بنابراین تصویری که از سیگنال‌ها ثبت می‌شود جابجا خواهد شد. تحلیل‌گر سریعاً این جابجایی را می‌فهمد و آینه را به گونه‌ای تغییر می‌دهد که تصویر منبع نقطه‌ای دوباره روی تصویر قبلی بیفتد و بدین ترتیب می‌توان نورگیری را تا جابجا شدن دوباره‌ی تصاویر ادامه داد. با استفاده از این تکنیک می‌توان تصویرهایی با زمان نوردهی بالا و قدرت تفکیک خوب بدست آورد.

برای این‌که این تکنیک کارایی لازم را داشته باشد، لازم است که سیگنال مرجع به اندازه‌ی کافی پرنور و نزدیک به منبع مورد نظر باشد. (فاصله‌ی کمتر از حدود 1 دقیقه قوسی)¹⁹ اما تعداد ستارگان پرنور آسمان بسیار کمتر از آن است که کل آسمان را برای اپتیک تطبیقی پوشش دهد. راهی که برای حل این مشکل ارائه شده، استفاده از ستاره‌ی مرجع لیزری است. یک پرتو لیزر را به سمت آسمان می‌فرستند. این پرتو ذرات موجود در لایه‌ی یونوسفر جو در ارتفاع حدود 100 کیلومتری را برانگیخته می‌کند و بدین ترتیب یک منبع نقطه‌ای مصنوعی ایجاد می‌کند. از سیگنال‌های این منبع می‌توان به عنوان سیگنال مرجع استفاده کرد.

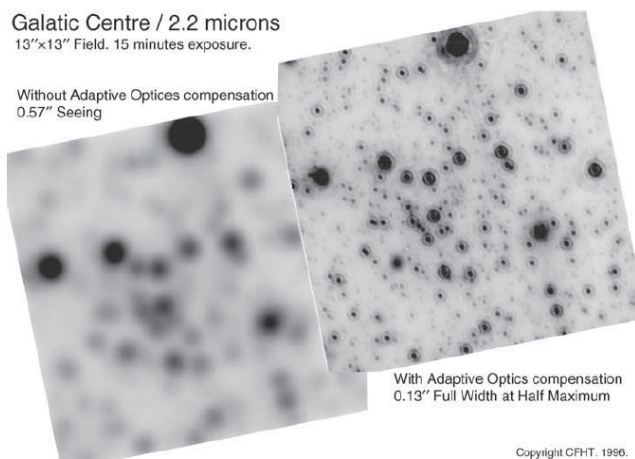


ستاره‌شناسان سایت VLT در شیلی در حال استفاده از لیزر برای ایجاد ستاره‌ی مصنوعی

¹⁹ فاصله زاویه‌ای منبع و مرجع باید به اندازه‌ای کوچک باشد که هر دو سیگنال از سلول‌های جوی یکسانی عبور کنند.

Galactic Centre / 2.2 microns
13"x13" Field. 15 minutes exposure.

Without Adaptive Optics compensation
0.57" Seeing



With Adaptive Optics compensation
0.13" Full Width at Half Maximum

Copyright CFHT, 1996.

استفاده از اپتیک تطبیقی کیفیت تصویر را به طور فوق العاده ای افزایش می دهد. شکل روبرو دو تصویر از یک ناحیه از مرکز کهکشان را نشان می دهد که در تهیه ی یکی از این تصاویر از اپتیک تطبیقی استفاده شده و در دیگری استفاده نشده است. تصویر سمت چپ بخاطر پارامتر دید مانند یک تصویر خارج از فوکوس بنظر می رسد. در تصویر سمت راست، الگوهای پراش دیده می شوند و قدرت تفکیک به حد پراش نزدیک است.

آشکارساز و CCD

آشکارساز دستگاهی است که نور جمع‌آوری شده را به شکل دیگری تبدیل می‌کند تا بتواند تحلیل شود. بسته به باند موج و خروجی مورد نظر، از آشکارسازهای مختلفی استفاده می‌شود که از آن‌ها می‌توان به فیلم‌های عکاسی، دریافت‌کننده‌های رادیویی، سی‌سی‌دی‌ها و ... اشاره کرد.

ساده‌ترین آشکارسازها سیگنال را از یک نقطه‌ای آسمان دریافت می‌کند. تلسکوپ به سمت نقطه‌ای از آسمان نشانه رفته است و آشکارساز فقط مقادیری را که به این نقطه مربوطاند، ثبت می‌کند. اگر نقشه‌ی یک منبع گسترده مورد نیاز باشد، تلسکوپ باید دوباره به سمت نقطه‌ی دیگری از منبع نشانه رود و آشکارساز اطلاعات را ثبت کند و این کار باید برای تک تک نقاط منبع گسترده انجام بگیرد. البته این روش بسیار آهسته است و هر جا ممکن بوده با آشکارسازهای تصویری که شامل تعداد زیادی "عنصر تصویر" یا پیکسل هستند، جایگزین شده است.

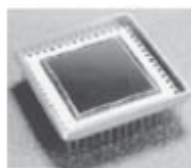
یکی از آشکارسازهای تصویری که به طور وسیعی در کارهای اپتیکی مورد استفاده قرار گرفته است و امروزه هم هنوز گاهی مورد استفاده قرار می‌گیرد، فیلم عکاسی است. مخصوصاً مواقعی که میدان‌دیده‌های بزرگ مطلوب هستند و بجای نتایج علمی عددی به دنبال تهیه‌ی تصاویر هستیم، فیلم عکاسی گزینه‌ی خوبی است.

امروزه برای کارهای علمی در سراسر جهان فیلم‌های عکاسی جای خود را به دستگاه بار جفت‌شده (*Charge Coupled Device*) یا سی‌سی‌دی داده‌اند. سی‌سی‌دی یک آشکارساز نیمه‌رسانا (تراشه) است که حساسیت بالای آن به مقادیر کم نور، رابطه‌ی خطی نتیجه‌ی آن با مقدار نور رسیده و ارتباط مستقیم آن با کامپیوتر، آن را به یک آشکارساز ایده‌آل برای اهداف علمی تبدیل کرده است.

هر پیکسل سی‌سی‌دی وقتی در معرض نور با انرژی در یک بازه‌ی خاص که سی‌سی‌دی برای آن طراحی شده است قرار می‌گیرد، الکترون‌ها بخاطر اثر فوتوالکتریک آزاد می‌شوند. تعداد الکترون‌های آزاد شده با تعداد فوتون‌های برخوردی متناسب است. الکترون‌های آزاد شده در زمان نوردهی در محل پیکسل جمع می‌شوند و در انتها با اعمال ولتاژ، بار الکتریکی هر پیکسل خط به خط خوانده می‌شود. سپس اطلاعات در یک فایل کامپیوتری در یک آرایه‌ی دو بعدی ذخیره می‌شود، که هر خانه‌ی این آرایه متناظر با یک پیکسل سی‌سی‌دی و مقدار خانه، عدد خوانده شده از روی سی‌سی‌دی است. این عدد با تعداد الکترون‌ها رابطه‌ی خطی دارد و $20DN$ یا $21ADU$ نامیده می‌شود. چون تعداد الکترون‌ها هم رابطه‌ی خطی با تعداد فوتون‌های رسیده دارد، هر چه عدد ADU بزرگ‌تر باشد، نشان‌دهنده‌ی نور بیشتری است. البته پیکسل‌ها نمی‌توانند بیشتر از یک مقدار نور را ثبت کنند. در صورتی که یک پیکسل در معرض نور زیادی قرار بگیرد، اشباع (سچوره) می‌شود. برای مثال سی‌سی‌دی‌های تلسکوپ هابل تا 70000 الکترون در هر پیکسل ظرفیت دارند. لازم به ذکر است

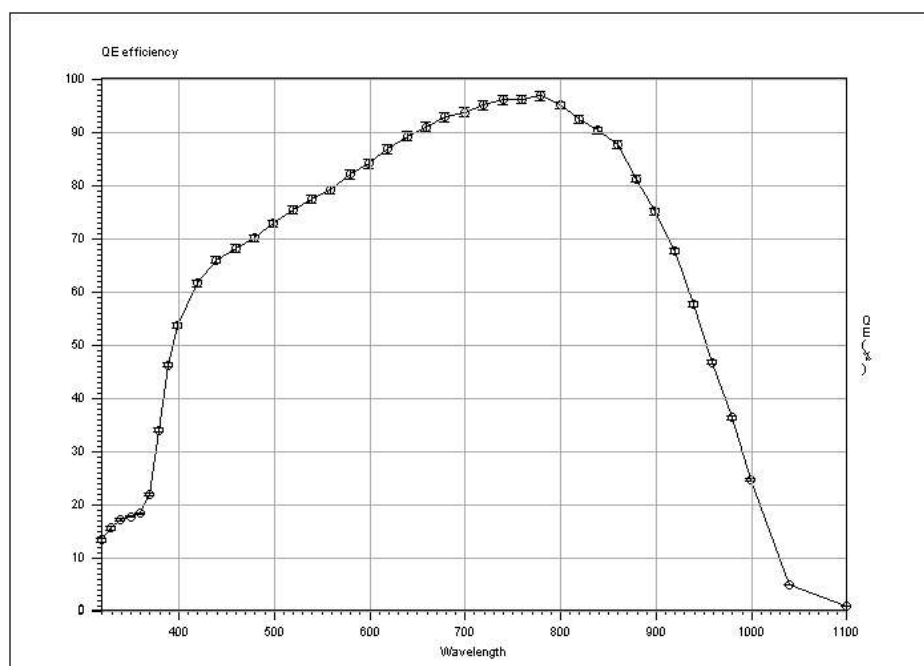
²⁰ Data Number
²¹ Analogue to Digital Unit

که سی سی دی فقط در یک بازه‌ی خاص رابطهی خطی دارد. مثلاً در حالت‌های نزدیک اشباع و یا تعداد فوتون‌های کم، ADU دیگر از رابطهی خطی پیروی نمی‌کند.



یک سی سی دی 2.46 سانتیمتری 1024×1024 پیکسل که هر پیکسل آن مربعی با ضلع $24\mu m$ است.

بازدهی کوانتومی چشم انسان در حدود 1% است؛ (یعنی از هر صد فوتون یکی آشکار می‌شود). در حالی که سی سی دی‌ها تقریباً 100% فوتون‌های رسیده را آشکار می‌کنند. البته بازدهی کوانتومی یک سی سی دی در طول موج‌های متفاوت فرق می‌کند. (شکل زیر)



نمودار بازدهی بر حسب طول موج برای یک سی سی دی

می‌دانیم که هر جسمی که دمایی بالاتر از صفر کلوین داشته باشد، تابش می‌کند. چون سی سی دی‌ها به فوتون‌ها بسیار حساس‌اند، تابش اجسام اطراف سی سی دی می‌تواند روی تصویر تشکیل شده اثر بگذارد. بنابراین سعی می‌شود محیط رصدخانه و خود سی سی دی را در دماهای پایین نگه دارند تا تابش اجسام اطراف کاهش یابد.

پردازش تصویر

ممکن نیست بتوانیم سیگنالی را بدون آنکه روی آن تاثیر بگذاریم آشکار کنیم. عبور سیگنال از ابزارهای اپتیکی تلسکوپ روی آن تاثیر می‌گذارد. تصویری که آشکارسازی می‌شود، تصویر خام نامیده می‌شود که باید بخاطر این آثار تصحیح شود. علاوه بر این، تصویر تصحیح شده که شامل یک یا چند آرایه از اعداد است باید به واحدهای شناخته شده‌ی معمول مانند قدر یا شار یا... که مستقل از تلسکوپ و ابزارهای استفاده شده هستند، تبدیل شود؛ یعنی سیگنال باید کالیبره شود. نتیجه‌ی نهایی یک تصویر پردازش شده است که مانند تصویری است که در بیرون جو زمین و با ابزارهای "ایده‌آل" تهیه شده باشد.

تصحیح تصویر:

سه نوع تصویربرداری برای تصحیح وجود دارد که باید قبل و بعد از رصد برای یک سی‌سی‌دی انجام شود. اطلاعات این تصاویر نهایتاً با تصویر علمی (تصویر هدف) ترکیب می‌شود تا نقص‌های موجود تصحیح شود و نویز کاهش پیدا کند. لازم است برای تهیه‌ی این تصاویر به اندازه‌ی تصویر اصلی دقت و توجه صرف شود تا تصحیح باعث بهبود تصویر شود و آن را بدتر نکند!

تصویر زمینه (*Bias*):

تصویر زمینه تصویری با مدت نوردهی صفر است که با شاتر بسته (مثل وقتی که درپوش تلسکوپ گذاشته شده است) انجام می‌گیرد. این تصویر، نقطه‌ی صفر سیگنال سی‌سی‌دی را نشان می‌دهد. اگر همه چیز ایده‌آل باشد، در تصویر زمینه مقدار عددی (DN) تمام پیکسل‌ها صفر (یا یک مقدار برابر که نشان‌دهنده‌ی نقطه‌ی صفر است) خواهد بود. اما این عملاً غیرممکن است. نقص‌های سی‌سی‌دی، آثار ناشی از محدودیت‌های ابزارهای الکترونیکی و عیوب انتقال داده در تصویر زمینه خود را نشان می‌دهند. معمولاً 5 تا 10 فریم تصویر زمینه قبل و بعد از رصد اصلی تهیه می‌شود. سپس اطلاعات این تصاویر پیکسل به پیکسل میانگین‌گیری می‌شود که در این میانگین‌گیری اگر اطلاعات پیکسل یک فریم با همان پیکسل در بقیه‌ی فریم‌ها تفاوت فاحشی داشته باشد، آن را حذف می‌کنند تا نتیجه‌ی دقیق‌تری بدست آید. در نهایت چون تصویر زمینه و تصویر علمی هر دو با همان سی‌سی‌دی و ابزارآلات تشکیل شده‌اند، با کم کردن تصویر زمینه از تصویر علمی (یعنی کم کردن مقدار هر پیکسل تصویر زمینه از مقدار پیکسل نظیر در تصویر علمی)، می‌توان آثار نقوص ابزارها را تا حد خوبی از میان برد. همچنین تهیه‌ی چندین تصویر زمینه و میانگین‌گیری از آنها، نسبت سیگنال به نویز را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد و موجب کاهش خطا می‌شود.

تصویر میدان تخت (Flat Field):

بعضی از پیکسل‌های سی‌سی‌دی حساسیت بیشتری نسبت به سایر پیکسل‌ها دارند. (بازدهی کوانتومی پیکسل‌ها با هم یکسان نیست.) همچنین ممکن است دانه‌های غبار روی تراشه‌ی سی‌سی‌دی یا روی دریچه‌ی دوربین یا فیلترهای رنگی مورد استفاده وجود داشته باشد. برای همین سیگنالی که آشکارساز از یک ستاره ثبت می‌کند، ممکن است بسته به اینکه نور ستاره در کجا کانونی شود، متفاوت باشد. یعنی دو ستاره با قدر یکسان ممکن است بدلیل حساسیت متفاوت سی‌سی‌دی یا گرد و غبار، با قدرهای متفاوت آشکار شوند. این تفاوت حساسیت در نقاط مختلف سی‌سی‌دی باید تصحیح شود وگرنه موجب افزایش نویز خواهد شد. تصحیح این آثار با تهیه‌ی تصویر میدان تخت انجام می‌شود.

تصویر میدان تخت با نشانه‌روی تلسکوپ به سمت یک منبع گسترده که به طور یکنواخت تلسکوپ را روشن کند، تهیه می‌شود. آسمان سپیده‌دم یا لامپ کوارتز در داخل گنبد تلسکوپ انتخاب‌های خوبی برای تهیه‌ی تصاویر میدان تخت هستند. معمولاً مدت زمان نوردهی به قدری انتخاب می‌شود که پیکسل‌ها تا نصف ظرفیت اشباعشان پر شوند.

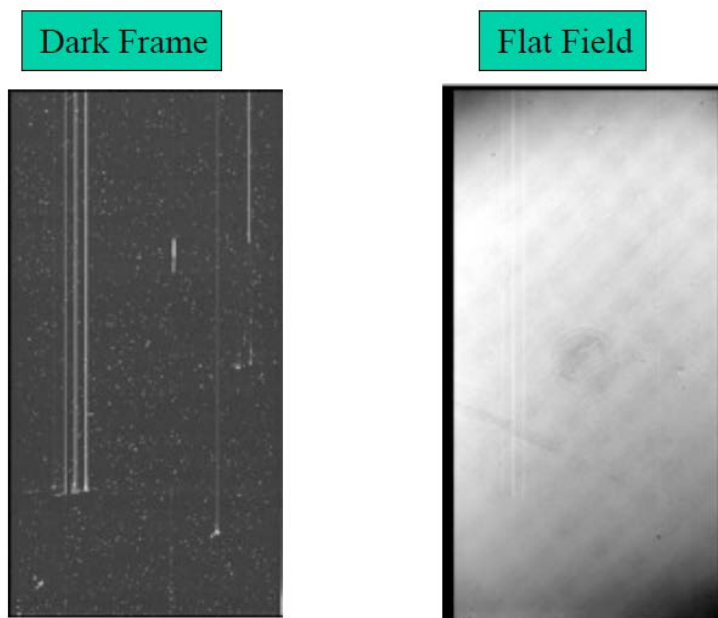
چون این اختلاف حساسیت پیکسل‌ها گاهی ناشی از گرد و غبار است، ضروری‌ست که تصاویر میدان تخت با فاصله زمانی کوتاهی قبل یا بعد از نوردهی اصلی تهیه شوند. همچنین حساسیت به طول‌موج بستگی دارد، بنابراین تصاویر میدان تخت باید برای فیلترهای متفاوت به‌طور جداگانه تهیه شوند.

برای تصحیح، ابتدا باید تصویر زمینه را از تصویر میدان تخت کم کنیم. مانند تصویر زمینه، بهتر است که چندین تصویر میدان تخت تهیه شود و سپس از آنها میانگین گرفته شود تا نتیجه‌ی بهتری بدست آید. چون حساسیت هر پیکسل در میزان سیگنال واقعی ضرب می‌شود، برخلاف تصحیح زمینه در تصحیح میدان تخت باید مقدار پیکسل‌های تصویر علمی را بر مقدار نظیر در تصویر میدان تخت (که آثار زمینه از آن حذف شده است) "تقسیم" کنیم.

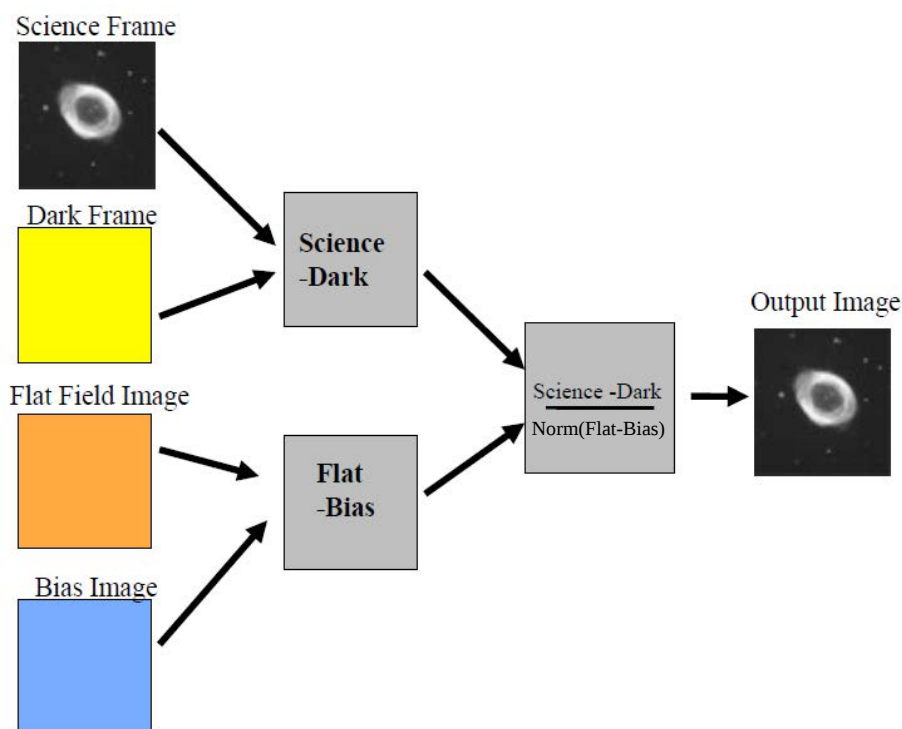
تصویر تاریک (Dark):

گفتیم که همه‌ی اجسام در همه‌ی طول‌موج‌ها تابش می‌کنند. اگر سی‌سی‌دی تا دمای مناسبی سرد نشده باشد، این تابش‌های اضافی باعث ایجاد نویز (جریان تاریک) می‌شوند. با کمک تصویر تاریک می‌توان آثار این نویزهای حرارتی را برطرف کرد. تصویر تاریک با شاتر بسته (یا درپوش گذاشته شده) و مدت زمان نوردهی یکسان با نوردهی اصلی تهیه می‌شود. سپس تصویر تاریک را از تصویر علمی کم می‌کنند. مانند دو نوع تصویر قبلی، تهیه‌ی چندین تصویر تاریک و میانگین‌گیری از آن‌ها دقت را افزایش می‌دهد.

در زیر یک تصویر تاریک و یک تصویر تخت که هر دو با یک سی سی دی تهیه شده اند را مشاهده می کنید. تصویر تاریک نقص های سی سی دی را نشان می دهد. تصویر میدان تخت یک طرح شطرنجی را نشان می دهد که در هنگام تولید آشکارساز ایجاد شده است و همچنین افت حساسیت در دو گوشه ی سی سی دی را نشان می دهد. چند لکه ی ناشی از غبار هم قابل مشاهده هستند.

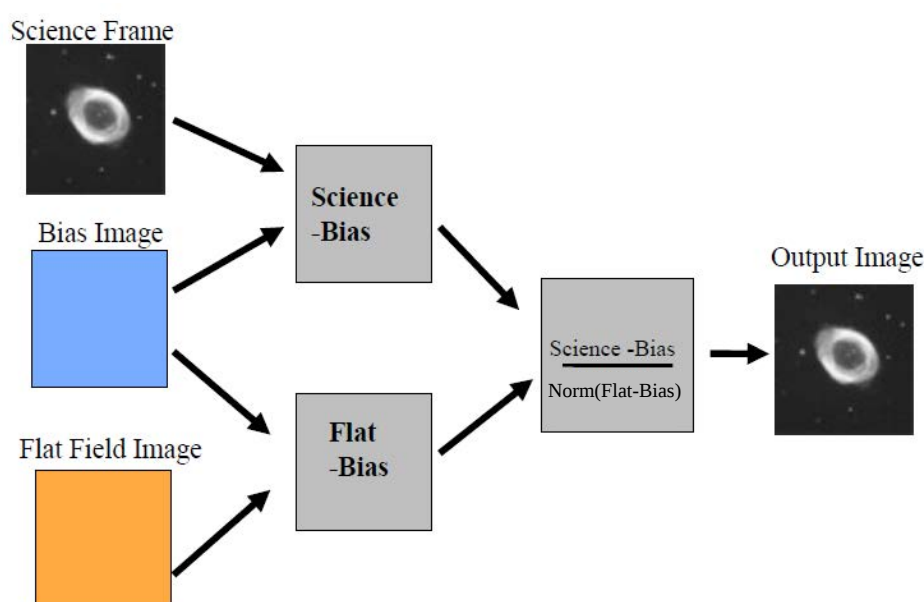


اگر میزان جریان تاریک چشم گیر باشد، تصاویر به شکل زیر با هم ترکیب می شوند تا تصویر نهایی بدست آید:



در اینجا منظور از $Norm(Flat - Bias)$ تصویر نرمالیزه شده $Flat - Bias$ است. برای نرمالیزه کردن یک تصویر، مقدار هر پیکسل را بر میانگین مقادیر پیکسل‌ها تقسیم می‌کنند. بدین ترتیب با تقسیم تصویر $Science - Bias$ بر نرمالیزه شده $Flat - Bias$ اطلاعاتی که مقدار هر پیکسل از شار در اختیار ما می‌گذارد، با همان شیوهی معمولی از تصویر نهایی قابل استخراج است. اما اگر آن را بر خود تصویر $Flat - Bias$ تقسیم کنیم، دیگر ضریب تبدیل عدد نشان داده شده در هر پیکسل به تعداد فوتون‌ها، مثل قبل نخواهد بود.

در نبود جریان تاریک (مثلاً وقتی سی‌سی‌دی با نیتروژن مایع سرد شده باشد)، تصاویر به شکل زیر ترکیب می‌شوند:



کالیبره کردن تصویر:

رایج‌ترین شیوهی کالیبره کردن سیگنال، مقایسه‌ی آن با یک سیگنال مرجع که شار معلومی دارد، می‌باشد. معمولاً تعدادی ستاره یا جرم پرنور در هر طول‌موج به عنوان کالیبراتور (یا ستاره‌ی استاندارد) اولیه هستند که بقیه‌ی رصدها با آن‌ها مقایسه می‌شوند. مثلاً برای ناحیه‌ی مرئی ستارگان نسرواقع (وگا) و شعرای یمانی و در ناحیه‌ی رادیویی اختروش²² های 3C 286 و 3C 48 مراجع خوبی هستند. برای نواحی فروسرخ از شهاب‌سنگ‌ها و سیارات استفاده می‌شود. از کالیبراتورهای ثانویه هم استفاده می‌شود. کالیبراتورهای ثانویه

منابعی هستند که شار آنها رابطه‌ی معلومی با شار کالیبراتورهای اولیه دارد و در پهنه‌ی وسیع‌تری از آسمان پخش شده‌اند به‌طوری که در هر مقطع رصدی یک یا چند تا از آنها در دسترس هستند.

در طول موج‌های مرئی و زیرمیلیمتری بدلیل افزایش قابل توجه میزان تضعیف نور در جو با زاویه‌ی سمت-الراسی، برای کالیبره کردن یک تصویر باید کالیبراتور را در همان زاویه‌ی سمت‌الراسی رصد کرد که منبع هدف رصد می‌شود.

پس از اینکه کالیبراتورها رصد شدند، کفایت عدد شمارش شده‌ی منبع موردنظر را در ضریب تبدیلی که از کالیبراتور بدست آمده است ضرب کنیم تا روشنایی منبع هدف بر حسب واحدهای شناخته‌شده مانند وات بر مترمربع یا قدر بدست آید.

واضح است که برای اینکه این سیستم کار کند، کالیبراتورهای اولیه باید به طور مطلق اندازه‌گیری شوند. این کار گاهی با مشاهده‌ی کالیبراتور به همراه یک منبع ساخته‌ی دست بشر که روشنایی معلومی دارد (مثلا جسم‌سیاهی با دمای مشخص و یا یک لامپ تنظیم‌شده)، انجام می‌گیرد. هم‌چنین برای ستاره‌هایی مانند وگا و شعرای یمانی می‌توان با داشتن بقیه‌ی پارامترهای ستاره مانند دما، فاصله و ... شار آن را محاسبه کرد. گاهی اوقات در رصدهای معمولی هم بجای استفاده از مقیاس نسبی که توضیح داده شد، از کالیبراسیون مطلق استفاده می‌کنند.

سیگنال به نویز

تنها بدست آوردن یک تصویر پردازش شده به کمک سی سی دی برای کار علمی کافی نیست. لازم است ببینیم خطاهای موجود چقدر است و نتایج بدست آمده از تصویر تا چه حد قابل اطمینان هستند. بدین منظور معمولا از نسبت سیگنال به نویز استفاده می کنند که نسبت سیگنال به نویز را نشان می دهد!! اگر سیگنال به نویز کم باشد، وجود یک پیک در روشنایی در یک ناحیه ی خاص از سی سی دی لزوما به معنی وجود یک منبع واقعی در آسمان نیست؛ بلکه ممکن است فقط یک پیک در میزان نویز باشد. اما اگر نسبت سیگنال به نویز زیاد باشد، آن گاه وجود یک پیک روشنایی احتمالا به یک منبع واقعی در آسمان مربوط می شود. حال که اهمیت سیگنال به نویز را فهمیدیم، بهتر است به طور کمی آن را بررسی کنیم.

ابتدا کمیت های زیر را معرفی می کنیم:

R_* = تعداد الکترون هایی که در یک ثانیه بخاطر نور ستاره ی هدف در سی سی دی برانگیخته می شوند.

R_{sky} = تعداد الکترون هایی که در یک ثانیه بخاطر نور زمینه ی آسمان در هر پیکسل از سی سی دی برانگیخته می شوند.

t = مدت زمان نوردهی

r = شعاع ناحیه ای که نسبت سیگنال به نویز را برای آن محاسبه می کنیم بر حسب پیکسل

n_{pix} = تعداد پیکسل های موجود در ناحیه ی مورد بررسی $= \pi \times r^2$

$Gain = G$ یا $inverse\ Gain$: کسر تبدیل الکترون به ADU

تعداد الکترون ها به ازای یک ADU

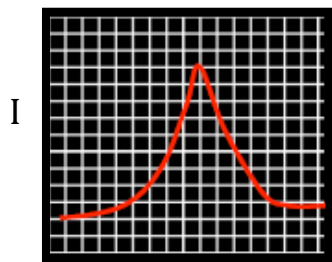
D = جریان تاریک بر حسب الکترون بر پیکسل بر ثانیه

سیگنال

سیگنال تعداد کل الکترون های برانگیخته شده در اثر نور منبع هدف است.
بنابراین:

$$S = R_* \cdot t$$

شکل بالا: تصویر ستاره بر روی سی سی دی



شکل پایین: نمودار شدت برای یک ردیف از پیکسل ها

نویز

نویز، به سیگنال‌های تصادفی و غیر مطلوب می‌گویند که با سیگنال اصلی جمع شده و آن را از شکل اصلی خارج می‌کند.

اثر ساچمه‌ای (*Shot Noise*):

تعداد فوتون‌هایی که در هر بازه به آشکارساز برخورد می‌کنند از توزیع پواسونی پیروی می‌کند. در نتیجه الکترون‌های برانگیخته شده هم توزیع پواسونی خواهند داشت. انحراف معیار توزیع پواسونی برابر با $\sqrt{N}$ است که N در آن تعداد اتفاقات آشکار شده است. بنابراین نویز اثر ساچمه‌ای ناشی از الکترون‌های برانگیخته می‌شود:

$$\sqrt{R_* \cdot t}$$

هم‌چنین الکترون‌های برانگیخته شده در اثر فوتون‌های رسیده از زمینه‌ی آسمان هم اثر ساچمه‌ای مشابهی دارند. عدم قطعیت روشنایی آسمان در ناحیه‌ی مورد نظر برابر می‌شود با:

$$\sqrt{R_{sky} \cdot t \cdot n_{pix}} = \sqrt{R_{sky} \cdot t \cdot \pi r^2}$$

نویز بازخوانی (*Readout Noise*):

مرحله‌ی خواندن اطلاعات از سی‌سی‌دی خود باعث ایجاد نویز در تصویر می‌شود. هرچه زمان این بازخوانی کوتاه‌تر باشد، نویز بیشتر خواهد بود. اگر RN^2 تعداد الکترون‌هایی باشد که به طور میانگین در هر پیکسل در اثر بازخوانی آزاد شده است، آنگاه نویز بازخوانی بدین صورت داده می‌شود:

$$\sqrt{RN^2 \cdot n_{pix}} = \sqrt{RN^2 \cdot \pi r^2}$$

در حالت کلی‌تر:

$$\sqrt{RN^2 + (0.5 G)^2} \cdot \sqrt{\pi r^2}$$

توجه کنید که نویز بازخوانی از مدت زمان نوردهی مستقل است.

نویز جریان تاریک (*Dark Current Noise*):

نویز جریان تاریک معمولا مساله‌ی مهمی نیست اما برای آشکارسازهای ناحیه‌ی فروسرخ نزدیک می‌تواند چشم‌گیر شود. با توجه به تعریف D نویز جریان تاریک می‌شود:

$$\sqrt{D \cdot n_{pix} \cdot t}$$

× در نهایت با در نظر گرفتن همه‌ی این نویزها، **نسبت سیگنال به نویز** در حالت کلی بدین صورت می‌شود:

$$\frac{S}{N} = \frac{R_* \cdot t}{(R_* \cdot t + R_{sky} \cdot t \cdot n_{pix} + (RN^2 + (0.5 G)^2) \cdot n_{pix} + D \cdot n_{pix} \cdot t)^{\frac{1}{2}}}$$

تبدیل سیگنال به نویز به خطا در قدر

معمولا در نجوم از مقیاس لگاریتمی قدر استفاده می‌شود، بنابراین خوب است بفهمیم یک نسبت سیگنال به نویز خاص معادل چه خطایی در اندازه‌گیری قدر است.

$$\begin{aligned} m \pm \delta m &= C_0 - 2.5 \log(S \pm N) \\ &= C_0 - 2.5 \log \left[S \left(1 + \frac{N}{S} \right) \right] \\ &= \underbrace{C_0 - 2.5 \log S}_m - \underbrace{2.5 \log \left(1 + \frac{N}{S} \right)}_{\delta m} \end{aligned}$$

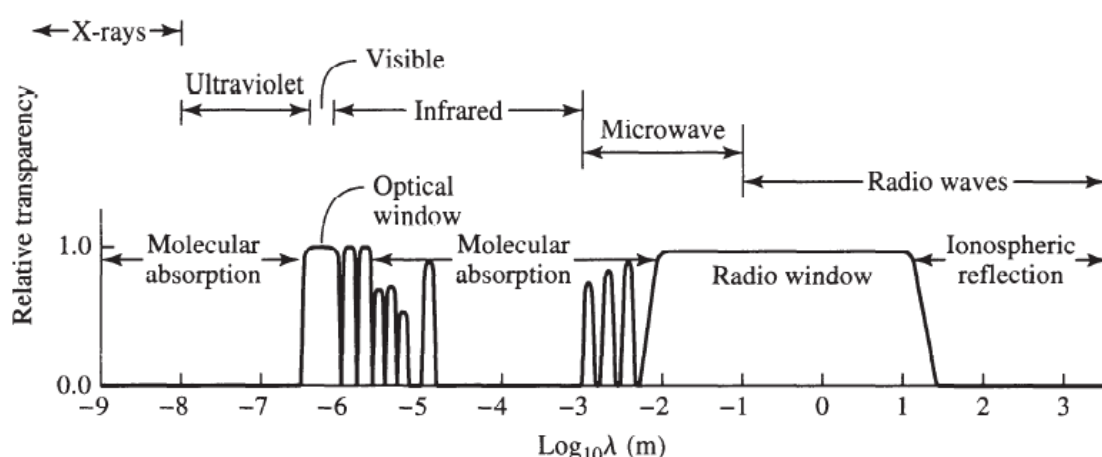
حال با استفاده از بسط تیلور عبارت مربوط به خطا را بسط می‌دهیم:

$$\begin{aligned} \delta m &= \pm 2.5 \log \left(1 + \frac{N}{S} \right) \\ &= \pm \frac{2.5}{\ln 10} \left[\frac{N}{S} - \frac{1}{2} \left(\frac{N}{S} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{N}{S} \right)^3 - \dots \right] \\ \delta m &\approx \pm 1.09 \frac{N}{S} = \pm \frac{1.09}{S/N} \end{aligned}$$

رصد در فیلترهای مختلف

پرواضح است که رصد در هر فیلتر طول موجی مشکلات خاص خودش را دارد. در این بخش به طور کوتاه و اجمالی به تفاوت‌ها و تکنیک‌های مختلف رصد در فیلترهای مختلف می‌پردازیم.

جو زمین، تابش را در بسیاری از طول موج‌ها جذب می‌کند. شکل زیر میزان شفافیت جو زمین را در برابر تابش طول موج‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، جو زمین فقط در برابر نور مرئی و قسمتی از نور رادیویی شفاف است و بقیه‌ی طول موج‌ها را جذب می‌کند. بیشتر جذبی که در اتمسفر اتفاق می‌افتد به خاطر وجود مولکول‌های بخار آب، کربن دی‌اکسید و اوزون (O_3) است.



امواج رادیویی

امواج رادیویی چون طول موج بلندی دارند، به ندرت با ذرات جو برخورد می‌کنند. بنابراین رصد در فیلتر رادیویی می‌تواند در شب و روز، در هوای آفتابی و ابری در ارتفاعات یا سطح دریا انجام بگیرد و مشکل خاصی ایجاد نمی‌شود. اما لایه‌ی یونوسفر که تقریباً در ارتفاع 50 – 500 کیلومتری سطح زمین قرار دارد، متشکل از ذرات بارداری است که امواج رادیویی با طول موج‌های بلندتر از چند ده متر را بازتاب می‌کنند و بنابراین امواج رادیویی فرازمینی با این طول موج‌ها نمی‌توانند به سطح زمین برسند.

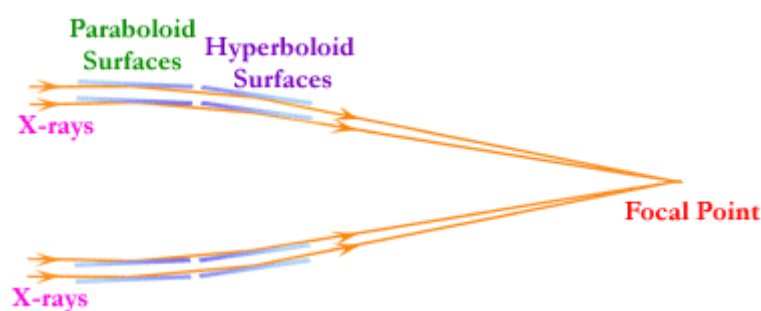
طول موج بلند امواج رادیویی باعث می‌شود قدرت تفکیک چندان خوب نباشد. $(\theta = 1.22 \frac{\lambda}{D})$ برای بهبود قدرت تفکیک در فیلتر رادیویی استفاده از تکنیک‌هایی مانند تداخل‌سنجی ضروری به نظر می‌رسد.

فروسرخ

علاوه بر جذب جوی، چیزی که رصد در فروسرخ را مشکل می‌کند، تابش اجسام است. با استفاده از قانون وین ($\lambda T = 0.0029 \text{ mK}$) اجسامی با دمای 300 K بیشترین تابش خود را در طول موج $10 \mu\text{m}$ تابش می‌کنند. بنابراین خود تلسکوپ و آشکارساز در همان طول موج‌هایی تابش می‌کنند که برای رصد مورد علاقه‌ی ماست. پس تلسکوپ و آشکارساز را باید تا دماهای پایین سرد کرد. هم‌چنین خود جو هم در طول موج‌های رادیویی تابش می‌کند و خطوط نشری مولکولی فروسرخ تولید می‌کند.

پرتوهای ایکس

پرتوهای ایکس قدرت نفوذ بالایی دارند. اگر بخواهیم از یک تلسکوپ عادی برای رصد پرتوهای ایکس استفاده کنیم، پرتوها از آینه رد می‌شوند و آینه نمی‌تواند آنها را بازتاب کند. تلسکوپ‌هایی که برای رصد در فیلتر ایکس ساخته می‌شوند را به گونه‌ای می‌سازند که پرتوها تقریباً مماس بر سطح آینه به آینه برخوردند. بدین ترتیب، فاصله‌ی بین ذرات آینه از دید پرتوها در این حالت کمتر از حالت عادی دیده می‌شود و پرتوها بجای نفوذ در آینه می‌توانند بازتاب شوند. شکل زیر یک نمونه تلسکوپ ایکس را نشان می‌دهد.

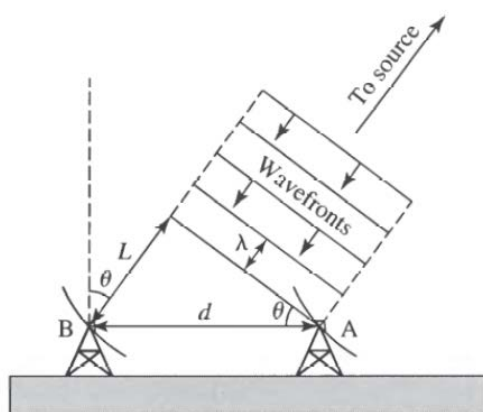


نمای شماتیک یک تلسکوپ که برای رصد در طول موج‌های ایکس ساخته شده است.

تداخل سنجی

برای بدست آوردن قدرت تفکیک خوب در طول موج‌های بلند به تلسکوپ‌هایی با قطر بسیار زیاد احتیاج است. (برای مثال برای بدست آوردن قدرت تفکیک $1''$ در طول موج 21cm قطر تلسکوپ باید از مرتبه‌ی چند ده کیلومتر باشد!!!) بدیهی است که دسترسی به تلسکوپ‌هایی با ابعاد خیلی بزرگ امکان‌پذیر نیست. برای رفع این مشکل منجمان از تکنیک تداخل سنجی استفاده می‌کنند.

در این روش منجمان با دو (یا چند) تلسکوپ که در مکان‌های متفاوتی مستقر شده‌اند به رصد می‌پردازند. با توجه به شکل زیر نوری که به یکی از تلسکوپ‌ها (B) می‌رسد، مسیر بیشتری را نسبت به نوری که به تلسکوپ



دیگر (A) می‌رسد طی کرده است. این اختلاف مسیر موجب یک اختلاف فاز بین نورهای رسیده به دو تلسکوپ می‌شود، داده‌های دو تلسکوپ را با استفاده از کامپیوتر تحلیل می‌کنند و با بررسی این اختلاف فاز، اختلاف مسیر دو پرتو (L) بدست می‌آید. سپس با داشتن فاصله‌ی دو تلسکوپ، تعیین مکان منبع موردنظر (محاسبه‌ی θ) کار ساده‌ای خواهد بود:

$$\sin \theta = \frac{L}{d}$$

با استفاده از این تکنیک منجمان به قدرت تفکیک‌هایی بهتر از $0.001''$ هم در طول موج‌های رادیویی دست پیدا کرده‌اند. در این حالت، بیشترین فاصله‌ی بین تلسکوپ‌ها مانند قطر دهانه‌ی موثر عمل می‌کند و قدرت تفکیک این گونه داده می‌شود:

$$\theta_d = 1.22 \frac{\lambda}{d_{max}}$$

مثال: آرایه‌ی تلسکوپی VLA^{23} در نیومکزیک، یک آرایه شامل 27 تلسکوپ رادیویی است که به شکل Y قرار گرفته‌اند. قطر هر تلسکوپ 25 m و بیشترین فاصله‌ی بین تلسکوپ‌ها 27 km است. قدرت تفکیک این آرایه در فرکانس 500 MHz چقدر است؟

²³ Very Large Array

ابتدا طول موج مورد نظر را محاسبه می کنیم:

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^8} = 0.6 \text{ m}$$

قطر دهانه ی موثر همان بیشترین فاصله ی بین تلسکوپ ها می شود، بنابراین:

$$\theta_d = 1.22 \frac{\lambda}{d} = 1.22 \times \frac{0.6}{27 \times 10^3} = 5.6''$$



آرایه ی تلسکوپی VLA در نیومکزیک

مقر تلسکوپ‌ها

لوله‌ی تلسکوپ به منظور رهگیری اجرام آسمانی بر روی یک مقر مستقر می‌شود. دو نوع مقر برای تلسکوپ‌ها استفاده می‌شود: مقر استوایی و مقر سمتی-ارتفاعی

رایج‌ترین مقری که برای تلسکوپ‌ها و به خصوص تلسکوپ‌های کوچک استفاده می‌شود، **مقر استوایی** است. برای تهیه‌ی تصویر از اجرام کم‌نور لازم است که تلسکوپ برای مدت طولانی به سمت آن‌ها نشانه رود و نورگیری انجام بگیرد. بدین منظور باید تلسکوپ را به کمک موتور به گونه‌ای حرکت داد که آثار چرخش زمین را خنثی کند. مقر استوایی شامل یک محور قطبی است که به سمت قطب شمال سماوی اشاره می‌کند و لوله‌ی تلسکوپ به دور این محور می‌چرخد تا به سادگی چرخش زمین را خنثی کند؛ تنها کافیست تلسکوپ را بر روی بعد و میلی که می‌خواهیم رصد کنیم تنظیم کنیم. لوله‌ی تلسکوپ که روی مقر استوایی مستقر شده است می‌تواند در راستاهای موازی و عمود بر استوا حرکت کند. اما متأسفانه ساخت مقر استوایی برای تلسکوپ‌های سنگین بسیار سخت و هزینه‌بر است. برای این تلسکوپ‌ها استفاده از **مقر سمتی-ارتفاعی** ساده‌تر است. مقر سمتی-ارتفاعی حرکت تلسکوپ در راستاهای موازی و عمود بر افق را ممکن می‌سازد. در این حالت، برای دنبال کردن یک جرم در آسمان، باید در هر لحظه سمت و ارتفاع جرم مورد نظر را محاسبه و تلسکوپ را با دو حرکت به سمت مکان جدید جرم موردنظر نشانه رفت. مشکلی که در استفاده از مقرهای سمتی-ارتفاعی وجود دارد این است که با اینکه مرکز چشمی همواره به سمت یک نقطه است اما میدان دید چشمی به مرور زمان می‌چرخد. البته با محاسبات سریع کامپیوتری امکان جبران این آثار فراهم می‌شود.

مسائل

این مسائل گزیده‌ای از سوالات مرحله اول و دوم المپیاد نجوم، مسائل کتاب‌های موجود در منابع و مسائل تالیفی است. در انتهای بعضی سوالات یک عدد در $\{\}$ آمده است که شماره‌ی منبعی که آن سوال از آن اقتباس شده است، می‌باشد.

1- با استفاده از یک دوربین عکاسی که شامل یک لنز نازک متقارن کروی با شعاع انحنای m 1 و قطر دهانه‌ی 5 cm است از یک منبع نقطه‌ای عکس‌برداری کرده‌ایم؛ به طوری که برای رنگ قرمز فوکوس باشد. قطر هاله‌ی آبی رنگ تشکیل شده در اطراف تصویر چقدر است؟
 $(n_{\text{آبی}} = 1.464 \text{ و } n_{\text{قرمز}} = 1.456)$

2- با استفاده از خواص سهمی ثابت کنید یک دسته پرتو موازی با محور اصلی یک آینه‌ی سهموی، پس از بازتاب همگی در یک نقطه (کانون) جمع می‌شوند.

3- با در نظر گرفتن ابیراهی کروی، رابطه‌ای برای فاصله‌ی کانونی تا مرتبه‌ی دوم نسبت به زاویه‌ی تابش بدست آورید.

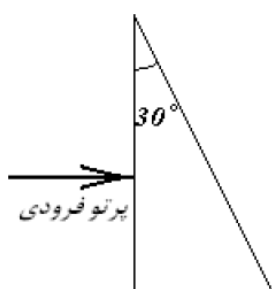
4- با استفاده از فرمول تصویر (پیوست 1) ثابت کنید برای اینکه پرتوهای رسیده از ستاره‌ها به طور موازی از چشمی خارج شوند، باید فاصله‌ی بین چشمی و شیئی برابر با مجموع فواصل کانونی آن‌ها باشد.

5- اگر از دو عدسی محدب نازک متقارن، از جنس پیرکس با ضریب شکست 1.474 که شعاع انحنای عدسی اول 1.000 متر و شعاع انحنای عدسی دوم 10.0 سانتیمتر است استفاده کنیم تا یک تلسکوپ بسازیم. فاصله بین آنها چند سانتیمتر باید باشد تا تلسکوپ ما درست کار کند؟
 مرحله اول دوره یازدهم

6- برای یک شیشه‌ی اپتیکی رابطه‌ی کوشی به صورت زیر است:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

$$A = 1.7280, \quad B = 0.01342 (\mu\text{m}^2)$$



از یک منشور به زاویه‌ی راس 30° به صورت نشان داده شده در شکل استفاده می‌کنیم. یک پرتو عمودی از یک لامپ سدیم به آن می‌تابانیم. اگر بخواهیم

طول موج‌های نزدیک $\lambda_1 = 586.0 \text{ nm}$ و $\lambda_2 = 589.5 \text{ nm}$ را روی دو پیکسل جداگانه از یک CCD به ابعاد پیکسل $10\mu\text{m} \times 10\mu\text{m}$ تشخیص دهیم. فاصله CCD از محل خارج شدن پرتو از منشور چقدر باید باشد؟ ضریب شکست هوا 1.0000 است.

مرحله اول دوره یازدهم

7- در مواردی که نیاز برای رصد خورشید برای منجمان آماتور وجود دارد، مثل گذر زهره، خورشیدگرفتگی‌ها، مشاهده‌ی لکه‌های بزرگ خورشید و مواردی از این دست، پیشنهاد می‌شود که حتی با فیلتر هم به خورشید نگاه نکنیم. در این موارد پیشنهاد می‌شود که از یک روزنه‌ی کوچک استفاده کنید و تصویر خورشید را روی یک پرده بیندازید. اگر گذر زهره را از این طریق رصد کنیم و فاصله‌ی روزنه از پرده نیز 2 متر باشد پهنای سایه‌ی زهره روی پرده چند میلیمتر خواهد بود؟

مرحله اول دوره یازدهم

8- فرض کنید تلسکوپ فضایی هابل با توان تفکیک 0.1 ثانیه قوسی در مدار دایره‌ای حول زمین می‌گردد. در صورتی که این تلسکوپ به سمت زمین نشانه رود قدرت تفکیک آن برای اجسام روی سطح زمین بدون در نظر گرفتن اثر جو چند متر خواهد بود؟ این تلسکوپ دارای دوره دوران 97 دقیقه حول زمین است.

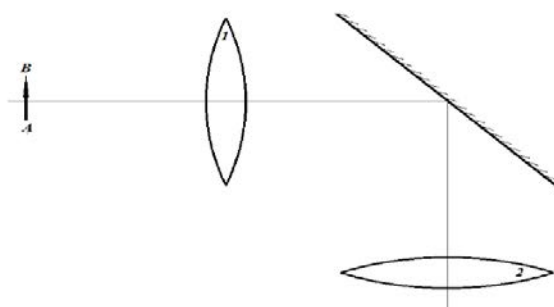
مرحله اول دوره دهم

9- یک تلسکوپ 3.5 متری دارای نسبت کانونی آینه اصلی 1.5 است. نسبت کانونی در خروجی کاسگرین این تلسکوپ 11 است. مقیاس تصویر این تلسکوپ در خروجی کاسگرین چند ثانیه قوسی بر میلیمتر است؟

مرحله اول دوره دهم

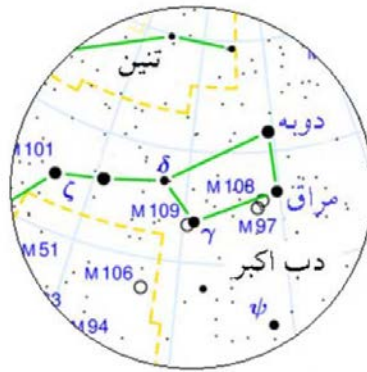
10- در شکل زیر تصویر $A'B'$ در کجا و در چه جهتی تشکیل خواهد شد؟ (جسم AB و تقاطع محور اپتیکی با آینه، روی کانون عدسی‌ها قرار گرفته‌اند).

مرحله اول دوره دهم



11- میدان دید این تلسکوپ چند استرادیان است؟

مرحله اول دوره نهم



12- فاصله کانونی عدسی چشمی (با میدان دید 5 درجه) تقریباً چند میلیمتر باشد تا خوشه کروی ρ_0 با اندازه زاویه‌ای 16.6 دقیقه قوسی توسط یک تلسکوپ یک متری با فاصله کانونی 1500 میلیمتر به طور کامل مشاهده شود؟

مرحله اول دوره هشتم

13- در تصویر برداری نجومی CCD ، ثبت N فوتون توسط CCD با خطای $\sqrt{N}$ همراه است. زمان نوردهی توسط این CCD چقدر باشد تا ستاره‌ای با قدر 15 را با دقت 0.02 قدر توسط یک تلسکوپ یک متری نورسنجی کنیم؟

راهنمایی: فرض کنید شار ثبت شده توسط این چیدمان برای ستاره‌ای با قدر ظاهری 15، یک فوتون بر ثانیه بر سانتیمتر مربع است.

مرحله اول دوره هشتم

14- چیدمانی اپتیکی شامل یک تلسکوپ و یک آشکارساز CCD با مشخصات مندرج در جدول زیر را فراهم آورده‌ایم. میدان دید و حد تفکیک زاویه‌ای در تصاویر ثبت شده توسط این چیدمان چقدر است؟

تلسکوپ	
$\frac{f}{10}$	نسبت کانونی
۱۴ اینچ	قطر دهانه تلسکوپ
آشکارساز CCD	
۹ میکرومتر $\times$ ۹ میکرومتر	ابعاد پیکسل (هر خانه تصویر)
۳۶/۰ میلی‌متر $\times$ ۲۴/۷ میلی‌متر	ابعاد فیزیکی CCD

مرحله اول دوره هشتم

15- اگر از یک تلسکوپ 12 اینچ اشمیت-کاسگرین با فاصله کانونی 2500 میلیمتر استفاده کنیم، به شرط قرار دادن یک چشمی معمولی (1.25 اینچ) با فاصله کانونی 26 میلیمتر و میدان دید ظاهری $FOV = 45^\circ$ ، میدان دید واقعی تشکیل شده در پشت چشمی تقریباً چند درجه خواهد بود؟
مرحله اول دوره ششم

16- برای رصد ستاره‌های خوشه پروین با گستردگی تقریبی 1.8 درجه در آسمان، استفاده از کدام ابزار را در اولویت میدانید؟

الف) تلسکوپ 16 اینچ اشمیت-کاسگرین با نسبت کانونی 6.3 و چشمی 2 اینچی 40 میلیمتر با میدان دید ظاهری چشمی 72°

ب) تلسکوپ 10 اینچ اشمیت-کاسگرین با فاصله کانونی 2540 میلیمتر و چشمی 26 میلیمتر با میدان دید ظاهری چشمی 50°

ج) تلسکوپ 5 اینچ شکستی با فاصله کانونی 625 میلیمتر و چشمی 10 میلیمتر با میدان دید ظاهری چشمی 50°

د) تلسکوپ 8 اینچ نیوتنی با نسبت کانونی 8 و چشمی 2 اینچی 32 میلیمتر با میدان دید ظاهری چشمی 72°

ه) تلسکوپ 12 سانتیمتری شکستی با نسبت کانونی 5 و چشمی 25 میلیمتر با میدان دید ظاهری چشمی 50°

مرحله اول دوره ششم

17- می‌خواهیم از یک تلسکوپ نیوتنی 5 اینچی با فاصله کانونی 1200 میلیمتر برای رصد استفاده کنیم. حداکثر فاصله‌ی کانونی چشمی چند میلیمتر باشد تا تمامی نور خروجی از آن وارد چشم رصدگر شود؟ (قطر مردمک چشم را 6 میلیمتر در نظر بگیرید.)

مرحله اول دوره ششم

18- رصدگری با استفاده از تلسکوپ 10 اینچ دابسونی با نسبت کانونی 5 در حال مشاهده سیاره مریخ است. اگر حداکثر مدت زمان عبور سیاره از دو سر میدان دید چشمی تلسکوپ 170 ثانیه باشد، فاصله‌ی کانونی چشمی تلسکوپ چند میلیمتر است؟ (فرض کنید مریخ روی استوای سماوی و میدان دید ظاهری چشمی $FOV = 45^\circ$ است.)

مرحله اول دوره ششم

19- اگر با یک تلسکوپ 24 سانتیمتری به ستاره‌ای نگاه کنیم، این ستاره چند برابر روشن‌تر از هنگامی دیده می‌شود که آن را با چشم غیر مسلح می‌بینیم؟

مرحله اول دوره پنجم

20- فرض کنید تلسکوپی به قطر 6.5 متر و نسبت کانونی 11 به یک دوربین CCD، که هر پیکسل آن $15\mu m$ طول و عرض دارد، متصل شده است. جرمی با قطر یک ثانیه قوسی بر روی این CCD چه مساحتی در واحد پیکسل مربع در بر می‌گیرد؟

مرحله اول دوره پنجم

21- اگر حداکثر زمان نوردهی مناسب برای این که ستاره‌ای با فاصله‌ی قطبی p بر روی فیلم عکاسی به صورت نقطه‌ای ثبت گردد Δt باشد، زمان نوردهی مناسب برای ثبت نقطه‌ای ستاره‌ای با فاصله‌ی قطبی $2p$ چند برابر Δt است؟

مرحله اول دوره سوم

22- چهار آنتن بشقابی رادیویی به قطر 3 متر در چهار گوشه متوازی‌الاضلاعی با اضلاع 100 و 150 متر قرار دارند و زاویه کوچک متوازی‌الاضلاع برابر 30 درجه است. نسبت حداقل به حداکثر قدرت تفکیک این مجموعه در طول موج 21 سانتی‌متر چقدر است؟

مرحله اول دوره سوم

23- اگر راصدی، شدت نور ستاره‌ی ϵCMi را از پشت تلسکوپ خود برابر شدت نور ستاره‌ی شباهنگ با چشم غیرمسلح دیده باشد، قطر آینه‌ی تلسکوپ او تقریباً چه اندازه است؟ قدرهای ظاهری ستاره‌های ϵCMi و شباهنگ به ترتیب 5.11 و 1.58- می‌باشد.

مرحله اول دوره دوم

24- با استفاده از تلسکوپی با فاصله کانونی 400 cm عکسی از خورشید گرفته شده است. اگر اندازه‌ی فیلم عکاسی $24 \times 36 mm$ باشد، اندازه‌ی قطر قرص خورشید در عکس چاپ شده در ابعاد $10 \times 15 cm$ چقدر خواهد بود؟

مرحله اول دوره سوم

25- کم‌نورترین ستاره‌ای را که می‌توان با تلسکوپ رصدخانه ابوریحان بیرونی دانشگاه شیراز، با قطر آینه‌ی اصلی 51 سانتی‌متر در شرایط ایده‌آل رصدی دید از چه قدری است؟

مرحله اول دوره اول

26- پرتوهای کیهانی از عوامل مزاحم در تصویربرداری‌های عمیق از آسمان هستند. این پرتوها با برخورد به سی‌سی‌دی‌ها و آزاد کردن الکترون باعث اشباع پیکسل‌های سی‌سی‌دی و در نتیجه از بین رفتن اطلاعات نورسنجی آن بخش از سی‌سی‌دی‌ها می‌شوند. برای برطرف کردن این مشکل، منجمان زمان کل نوردهی سی‌سی‌دی را معمولاً به چند زمان کوتاه‌تر تقسیم می‌کنند تا در مجموع اطلاعات همه‌ی پیکسل‌های یک سی‌سی‌دی را در اختیار داشته باشند. یعنی اگر در یک نوردهی، پرتوی کیهانی موجب اشباع یک پیکسل شود، در نوردهی بعدی از این امر در امان بماند.

منجمی از تلسکوپ فضایی هابل برای تصویربرداری استفاده می‌کند. در این مورد، پرتوهای کیهانی با آهنگ 100 پرتو در ثانیه در سانتی‌متر مربع، به طور تصادفی اما با توزیع یکنواخت فرود می‌آیند. این تلسکوپ دارای فاصله‌ی کانونی 57.6 متر است و میدان دید آشکارساز آن مربعی به ضلع 160 ثانیه‌ی قوسی است. پهنای زاویه‌ای (ضلع) هر پیکسل مربعی شکل این سی‌سی‌دی 0.04 ثانیه قوسی است. اگر مدت زمان نورگیری از یک منطقه از آسمان 2 ساعت باشد، حداقل تعداد تصاویری را که تلسکوپ هابل باید عکس‌برداری کند تا کمتر از 5% پیکسل‌های هر عکس به دلیل برخورد پرتوهای کیهانی اشباع شده باشد را بیابید. فرض کنید هر پرتو کیهانی به هنگام اصابت به سی‌سی‌دی، تنها یک پیکسل را به اشباع می‌رساند.

مرحله دو دوره دهم

27- توسط تلسکوپی با دهانه‌ی 20 سانتیمتر و فاصله‌ی کانونی 150 سانتیمتر، از ماه عکسی با زمان نوردهی 0.15 ثانیه گرفته‌ایم.

(الف) زمان نوردهی لازم برای تلسکوپی با دهانه‌ی 15 سانتیمتر و فاصله کانونی 200 سانتیمتر، برای تهیه‌ی عکسی یکسان با عکس فوق چقدر است؟

(ب) اندازه‌ی تصویر ماه در صفحه‌ی کانونی هر تلسکوپ چقدر است؟

(ج) هر دو تلسکوپ، جهت مشاهده‌ی ماه، با عدسی چشمی به فاصله کانونی 25 میلیمتر به کار می‌روند. بزرگنمایی این تلسکوپ‌ها چقدر خواهد بود؟

مرحله دو دوره سوم

28- یکی از ابزارهایی که فضانوردان آپولو 11 که به ماه سفر کردند، روی سطح این قمر کار گذاشتند، آینه‌ی مربع شکلی بود به ابعاد 70 سانتیمتر. این آینه از حدود 100 تکه‌ی کوچک‌تر ساخته شده بود. هر کدام از این آینه‌ها به شکلی طراحی شده بودند که نور را در همان راستایی که به آن‌ها می‌تابند باز می‌تابانند. این آینه روی پایه‌ای نصب شده بود که به کمک آن فضانوردان آینه را به سمت زمین تنظیم کردند. به کمک این آینه‌ها اخترشناسان می‌توانند فاصله‌ی زمین تا ماه را با دقت سانتی‌متر اندازه‌گیری کنند. برای این کار از روی زمین با لیزر به سمت آینه‌ها نور می‌تابانند و زمان رفت و برگشت نور را اندازه‌گیری

می‌کنند و از روی آن فاصله را بدست می‌آورند. به کمک اطلاعات بسیار دقیقی که از این طریق بدست می‌آید می‌توان آهنگ دورشدن ماه از زمین و بعضی از حرکات پوسته‌ی زمین را بررسی کرد. رصدخانه‌ی مک دونالد در ایالت تگزاس آمریکا به طور مداوم به کمک این آینه‌ها فاصله‌ی ماه را اندازه‌گیری می‌کند. منجمان در رصدخانه‌ی مک دونالد برای اندازه‌گیری فاصله از یک لیزر قوی و یک تلسکوپ 30 اینچی استفاده می‌کنند. هر چند که لیزر، نور متمرکز تولید می‌کند اما بخاطر پراش نور و اثرات جوی، قطر باریکه‌ی نور هنگامی که به سطح ماه می‌رسد در حدود 7 کیلومتر می‌شود. حساب کنید که توان لیزر (P)، چقدر باید باشد تا نور بازتابیده از آینه‌ها درون چشمی تلسکوپ با چشم قابل مشاهده باشد. از جذب نور در جو زمین صرف‌نظر کنید و آینه‌ها را بازتابنده کامل در نظر بگیرید.

مرحله دو دوره سوم

29- یک تلسکوپ 8 اینچی با نسبت کانونی $\frac{f}{10}$ به یک سی‌سی‌دی $1024 \times 1024 \text{ pixel}^2$ که هر پیکسل آن مربعی به ضلع $9 \mu\text{m}$ است، مجهز شده است. میدان دید و قدرت تفکیک این تلسکوپ را (الف) در یک حیاط پشتی با پارامتر دید $\theta_s = 2''$ (ب) روی یک کوه بلند با $\theta_s = 0.4''$ تعیین کنید. (ج) آیا این تلسکوپ می‌تواند در هر کدام از این مکان‌ها به قدرت تفکیک بیشتری دست پیدا کند؟ {2}

30- کهکشانی در فاصله‌ی $D = 25 \text{ Mpc}$ با قدرت تفکیک $1''$ در فرکانس $4.57 \times 10^{14} \text{ Hz}$ و پهنای فرکانسی $\Delta\nu = 2 \times 10^{12} \text{ Hz}$ به منظور آشکارسازی نواحی HII رصد می‌شود. نویز نقشه که برای زمان نوردهی انتظار می‌رود برابر است با:

$$N = 2 \times 10^{-17} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

آیا یک ناحیه‌ی HII با قطر $d = 500 \text{ pc}$ و درخشندگی $L = 10^{39} \text{ erg s}^{-1}$ می‌تواند در این بازه‌ی فرکانسی به این طریق آشکار شود؟ آیا این ناحیه قابل تفکیک خواهد بود؟ {2}

31- اگر ضریب شکست هوا در طول موج مرئی در سطح دریا، 1.0003 باشد، بیضویت خورشید (نسبت قطر اقصر به اطول) را برای زمانی که لبه‌ی پایینی خورشید روی افق به نظر می‌رسد، محاسبه کنید. {2} راهنمایی: از تقریب جو تخت استفاده کنید.

32- چند سال طول می‌کشد تا حرکت خاصه‌ی باقی‌مانده‌ی ابرنواختر Cas A که در فاصله‌ی 3.4 kpc قرار دارد و با سرعت 4000 km s^{-1} منبسط می‌شود، توسط تلسکوپی رادیویی با دهانه‌ی موثر $D_{\text{eff}} = 32 \text{ km}$ آشکار شود؟ {2}

33- یک کهکشان به شکل دایره‌ای از روبرو دیده می‌شود و قطر زاویه‌ای آن $10''$ است. در کدام یک از شرایط زیر کهکشان مانند یک منبع نقطه‌ای خواهد بود؟ {2}

الف) یک تلسکوپ اپتیکی آماتوری 2 اینچی در پارامتر دید $2''$
 ب) بزرگترین تلسکوپ رادیویی تک دیش در جهان با قطر 305 m که در طول موج 20 cm رصد می‌کند.

ج) تلسکوپ فضایی اسپیتزر با قطر 0.85 m که در فروسرخ در طول موج $60\text{ }\mu\text{m}$ رصد می‌کند.

34- در یک شب با دید ضعیف ($\theta_s = 4''$) دو سیاره‌ی مشتری و اورانوس (هر دو در حالت مقابله) با چشم دیده می‌شوند. تعداد تقریبی قرص‌های دید روی سطح این دو سیاره را تعیین کنید و بگویید که هر کدام از آن‌ها چشمک می‌زند یا خیر؟ {2}

35- نشان دهید اگر فاصله‌ی شی از عدسی خیلی بیشتر از فاصله کانونی باشد ($P \ll f$)، تصویر روی صفحه کانونی تشکیل می‌شود. شرایط پدیده‌های نجومی همیشه این گونه است. {1}

36- نشان دهید اگر دو عدسی با فواصل کانونی f_1 و f_2 بلافاصله پشت سر یکدیگر قرار گرفته باشند، فاصله کانونی موثر ترکیب این دو از این رابطه بدست می‌آید: {1}

$$\frac{1}{f_{eff}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

نکته: اگر فاصله‌ی بین دو عدسی را x بگیریم، این تقریب تنها هنگامی مجاز است که $f_1 \gg x$ و $f_2 \gg x$

37- الف) با استفاده از نتیجه‌ی مساله‌ی قبلی نشان دهید که یک سیستم عدسی مرکب که از دو عدسی با ضریب شکست‌های متفاوت $n_{1\lambda}$ و $n_{2\lambda}$ تشکیل شده، می‌تواند به گونه‌ای ساخته شود که در دو طول موج خاص λ_1 و λ_2 فاصله‌ی کانونی یکسانی داشته باشد:

$$f_{eff,\lambda_1} = f_{eff,\lambda_2}$$

ب) به طور کیفی بحث کنید که این شرایط تضمین نمی‌کند که فاصله‌ی کانونی برای تمامی طول موج‌ها برابر باشد. {1}

38- الف) با استفاده از معیار ریلی، قدرت تفکیک چشم انسان را در طول موج 550 nm حساب کنید. قطر مردمک چشم انسان را 6 mm در نظر بگیرید.

ب) پاسخ قسمت الف را با قطر زاویه‌ای ماه و مشتری مقایسه کنید. (داده‌های مورد نیاز خود را پیدا کنید!) چه نتیجه‌ای می‌گیرید؟ {1}

39- تلسکوپ نیوتکنولوژی (*NTT*) در رصدخانه‌ی جنوبی اروپا تلسکوپی با آینه‌ی اولیه به قطر 3.58 m و نسبت کانونی $f/2.2$ است.

الف) فاصله کانونی آینه‌ی اولیه‌ی *NTT* را محاسبه کنید.

ب) مقیاس صفحه‌ی *NTT* چقدر است؟

ج) $\epsilon\text{ Bootes}$ یک دوتایی است که فاصله‌ی مولفه‌های آن $2.9''$ است. فاصله‌ی خطی بین تصاویر مولفه‌ها در صفحه‌ی کانونی آینه‌ی اولیه‌ی *NTT* چقدر است؟ {1}

40- در حالت "سیاره‌ای"، $WF/PC\ 2$ ی تلسکوپ هابل دارای نسبت کانونی $f/28.3$ و مقیاس صفحه‌ی $0.0455''\text{pixel}^{-1}$ است. میدان دید این سی‌سی‌دی را در حالت "سیاره‌ای" حساب کنید. {1}

41- قطر یک دیش رادیویی چقدر باید باشد تا سطح مقطع جمع‌آوری معادل با 27 تلسکوپ *VLA* داشته باشد؟ {1}

42- زاویه‌ی جهت‌گیری یک تداخل‌سنج رادیویی چقدر باید تغییر کند تا از یک ماکسیمم تداخل به ماکسیمم بعدی برسد؟ فرض کنید فاصله‌ی دو تلسکوپ برابر با قطر زمین است و رصد در طول موج 21 cm انجام می‌شود. پاسخ خود را بر حسب ثانیه قوسی بیان کنید. {1}

43- ماموریت *SIM* به گونه‌ای طراحی شده است که بتواند دو منبع نقطه‌ای را با دقت $0.000004''$ برای اجرامی به کم‌نوری قدر 20 در نور مرئی تفکیک کند. این کار با استفاده از تداخل‌سنجی اپتیکی امکان می‌یابد.

الف) فرض کنید چمن با نرخ 2 cm در هفته رشد می‌کند. و فرض کنید *SIM* یک ساقه چمن را در فاصله‌ی 10 کیلومتری رصد می‌کند. چقدر طول می‌کشد تا *SIM* یک تغییر قابل اندازه‌گیری در طول ساقه‌ی چمن را آشکار کند؟

ب) اگر از فاصله‌ی موثری به اندازه‌ی قطر مدار زمین برای تداخل‌سنجی بهره ببریم، *SIM* تا چه فاصله‌ای می‌تواند به کمک اختلاف منظر فاصله‌ی ستارگان را اندازه بگیرد؟ (فرض کنید ستاره‌ها به اندازه‌ی کافی پرنور باشند).

ج) قدر ظاهری خورشید اگر در فاصله‌ای که در قسمت ب بدست آوردید قرار داشت، چقدر می‌شد؟

پارامتر دید (*seeing*)، کمترین فاصله‌ی زاویه ایست که با توجه به وجود اعوجاجات جوی قابل تفکیک است.

د) اگر لایه‌های مورد نظر در ارتفاع 15 تا 19 کیلومتری از سطح زمین قرار داشته باشند، حد بالای پارامتر دید را محاسبه کنید.

اپتیک تطبیقی روشی است که در آن با توجه به تغییر مکان یک ستاره‌ی پرنور در اثر اعوجاجات جوی، اثر این اعوجاجات را خنثی می‌کنند و بدین ترتیب پارامتر دید بهبود می‌یابد.

ه) با توجه به زاویه‌ی حدی بدست آمده در بالا می‌توان کل آسمان را به نواحی کوچکتری تقسیم کرد. اگر در هر ناحیه ستاره‌ای پرنور (ستاره‌های با قدر کمتر از 12 پرنور هستند) وجود داشته باشد می‌توان با تصحیح اعوجاجات جوی پارامتر دید را بهبود داد. برای این کار به چند ستاره‌ی پرنور احتیاج داریم؟

و) ثابت کنید تعداد ستاره‌های پرنور آسمان خیلی کمتر از ستاره‌های مورد نیاز است. فرض کنید ستاره‌ها همه خورشیدگون هستند و چگالی تعداد آنها ستاره $0.15 \frac{\text{ستاره}}{pc^3}$ است.

ز) چون تعداد ستاره‌های پرنور برای تصحیح اعوجاجات کل آسمان کافی نیست می‌توان با استفاده از لیزر ستاره‌ی پرنور مصنوعی ایجاد کرد. به این ترتیب که لیزری را به لایه‌ای در 92 کیلومتری سطح زمین می‌فرستیم و قسمتی از آن لایه برای ما روشن می‌شود. توان لیزر حداقل چقدر باید باشد؟

ح) با استفاده از این تکنیک و تصحیح اعوجاجات جوی، پارامتر دید بهبود یافته و به 0.0015 ثانیه قوسی می‌رسد. آیا در این صورت می‌توان ستاره‌ی آلفا قنطورس را با کمک تلسکوپ‌های کک به صورت یک جسم گسترده تفکیک کرد؟

ط) برای اینکه از این پارامتر دید تصحیح شده بهترین استفاده را ببریم، باید چه نکاتی را در ساخت رصدخانه لحاظ کنیم؟

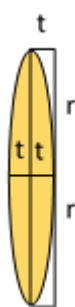
سوال دوره تابستانی 1393 (نسخه بازبایی شده)

48- شکل نوین بیان اصل فرما می‌گوید: پرتو نوری که می‌خواهد از نقطه‌ای معین به نقطه‌ای دیگر برود، باید یک طول راه نوری را که نسبت به تغییرات آن مسیر مانا است، بپیماید. یا به عبارت دیگر اگر قرار باشد پرتوهای نوری مختلفی مسیر این دو نقطه را طی کند هر پرتو باید طول همسانی از مسیر نوری را بپیماید. (مسیر نوری یعنی طول مسیر فیزیکی ضربدر ضریب شکست که روی همه‌ی محیط‌ها جمع می‌شود).

با توجه به اصل فرما ثابت کنید برای یک عدسی بسیار نازک که برای بررسی اجسام بسیار دور ساخته می‌شود با تقریب‌هایی که در نظر خواهیم داشت رابطه‌ی عدسی‌سازان برقرار است. برگرفته از مجموعه سوالات نیما چرتاب سلطانی

49- با استفاده از اصل فرما، قانون اسنل و قانون بازتاب را اثبات کنید. (پیوست 1)

50- با کمک قانون عدسی‌سازان و فرمول تصویر، رابطه‌ای برای فاصله‌ی کانونی یک عدسی آکروماتیک متشکل از یک عدسی دوکوژ و یک عدسی کاو-تخت بر حسب ضرایب شکست شیشه‌ها و ضخامت (t) و شعاع عدسی (r) بدست آورید. سپس فواصل کانونی رنگ‌های آبی و قرمز را برای عدسی با مشخصات زیر بدست آورده و با یکدیگر مقایسه کنید. در چه صورتی عدسی آکروماتیک بهتر می‌تواند ابیراهی رنگی را حذف کند؟

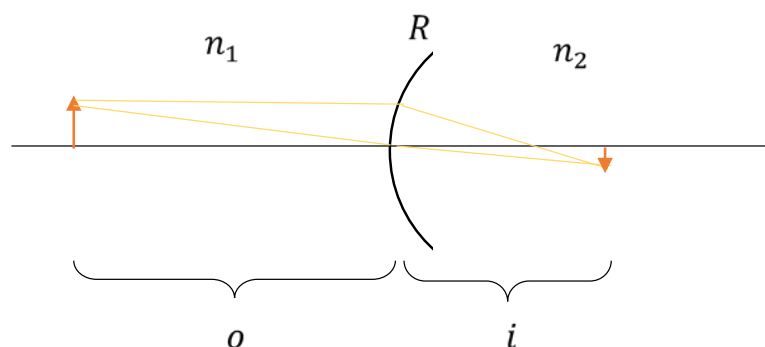


1.523	$n_{\text{آبی, دوکوژ}}$
1.638	$n_{\text{آبی, کاو-تخت}}$
1.515	$n_{\text{قرمز, دوکوژ}}$
1.622	$n_{\text{قرمز, کاو-تخت}}$
2 cm	t
50 cm	r

51- می‌توان اثبات کرد برای یک نور که از محیط n_1 به محیط n_2 می‌رود که سطح تقاطعشان کره‌ای به شعاع R است، رابطه‌ی زیر برقرار است:

$$\frac{n_1}{o} + \frac{n_2}{i} = \frac{n_2 - n_1}{R}$$

با کمک این فرمول و روشی که برای تبدیل بازتاب به شکست در پیوست 1 گفته شده است، فرمول تصویر را برای آینه‌های محدب و مقعر اثبات کنید. حال که اساسی‌ترین فرمول اپتیکی آینه‌ها از این روش بدست می‌آید، پس در سایر مواقع هم استفاده از این روش جواب می‌دهد.



پیوست 1

چند قانون کلی در شکست و بازتاب نور

بر طبق اصل فرما، نور همواره مسیری را طی می‌کند که کمترین زمان ممکن به طول بینجامد. با استفاده از این اصل، دو قانون مهم و کلی برای بازتاب و شکست نور اثبات می‌شوند.

نور در خلا با سرعت c منتشر می‌شود، اما در محیط‌های دیگر با سرعت کمتری حرکت می‌کند. به نسبت سرعت نور در خلا به سرعت نور در یک محیط، ضریب شکست آن محیط می‌گویند. بنابراین ضریب شکست خلا برابر با 1 و ضریب شکست سایر محیط‌ها از یک بیشتر است.

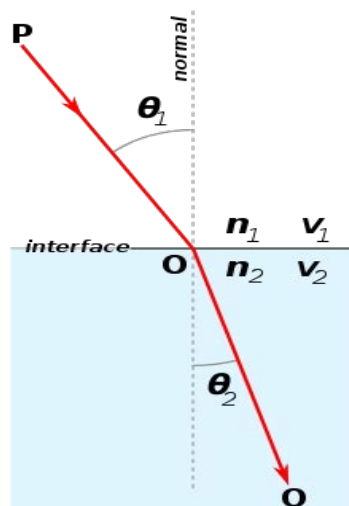
$$n = \frac{c}{v}$$

قانون اسنل:

وقتی نور از یک محیط به محیط دیگری با ضریب شکست متفاوت می‌رود، شکسته می‌شود. یعنی جهت حرکت آن تغییر می‌کند. زاویه‌ی بین خط عمود بر خط جداکننده‌ی دو محیط و مسیر نور در محیط اول با ضریب شکست n_1 را θ_1 و زاویه‌ی آن با مسیر نور در محیط دوم را θ_2 می‌نامیم. با استفاده از اصل فرما می‌توان ثابت کرد که رابطه‌ی زیر بین θ_1 و θ_2 و ضرایب شکست دو محیط برقرار است:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

این رابطه به قانون اسنل-دکارت مشهور است.



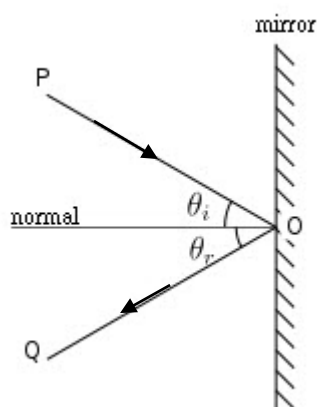
اگر محیط 2 غلیظ‌تر از محیط 1 باشد ($n_2 > n_1$)، با توجه به رابطه‌ی بالا پرتو به خط عمود نزدیک‌تر می‌شود و بالعکس اگر محیط 2 رقیق‌تر باشد، پرتو از خط عمود دور می‌شود.

قانون بازتاب:

وقتی نور به یک سطح می‌خورد، بخشی از آن از سطح بازتاب می‌شود. باز هم با اصل فرما می‌توان نشان داد که زاویه تابش (زاویه بین پرتو فرودی و خط عمود بر سطح) با زاویه بازتابش (زاویه بین پرتو بازتابی و خط عمود بر سطح) برابر است. به زبان ریاضی:

$$\theta_i = \theta_r$$

که θ_i زاویه تابش و θ_r زاویه بازتابش است.



اما این قانون را می‌توان به سادگی با جایگذاری $n_2 = -n_1$ در قانون اسنل بدست آورد. (اگر جهت زوایا را در نظر بگیریم، در واقع داریم: $\theta_i = -\theta_r$) بسیار جالب است! این یعنی کفایت فرمول‌های مورد نیاز خود را برای حالت شکست بدست آوریم و سپس تنها با جایگذاری $n_2 = -n_1$ معادل آنها برای حالت بازتاب بدست می‌آید. (یک شهود ناقص از این موضوع این است که در اثر بازتاب جهت سرعت نور تغییر می‌کند و سرعت منفی می‌شود. اگر این منفی بودن را در تعریف ضریب شکست در نظر بگیریم، مانند این است که نور وارد محیط جدیدی با ضریب شکست منفی شده است. البته این شهود کامل نیست، چرا که در این صورت ضریب شکست برای پرتوهای عمودی نسبت به جهت مرجع، صفر می‌شود!!!)

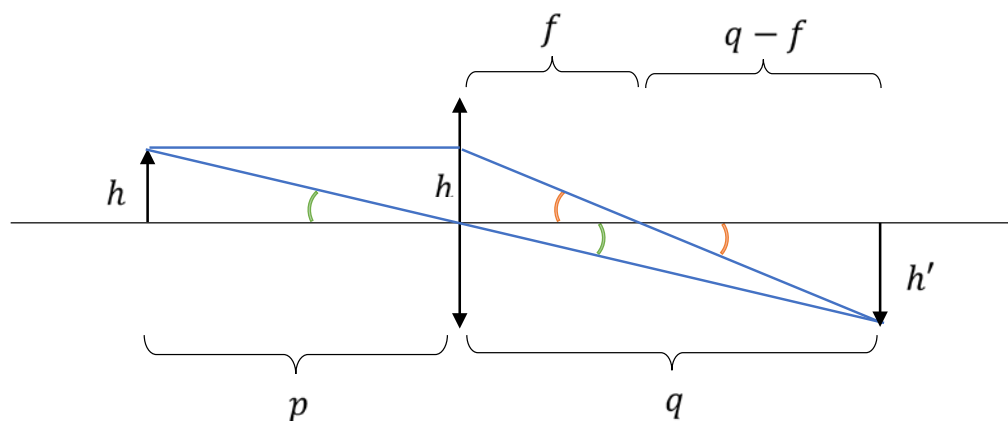
فرمول تصویر

برای آینه‌ها و عدسی‌ها رابطه‌ی زیر بین فاصله‌ی شی تا آینه یا عدسی و فاصله‌ی تصویر تا آن برقرار است:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

که در آن p فاصله‌ی شی تا ابزار اپتیکی و q فاصله‌ی تصویر از آن و f فاصله‌ی کانونی (موثر) است. این فرمول یکی از پایه‌ای‌ترین فرمول‌ها در بررسی عدسی‌ها و آینه‌ها به شمار می‌رود.

این رابطه را برای عدسی‌ها اثبات می‌کنیم و اثبات آن برای آینه‌ها به عنوان یک مساله در نظر گرفته شده است. (مساله 46) برای اثبات این رابطه، شکل زیر را در نظر بگیرید. با توجه به تشابه دو به دو مثلث‌های قائم‌الزاویه (که از هر مثلث یک زاویه‌ی حاده مشخص شده است):



$$\frac{h'}{q} = \frac{h}{p}$$

9

$$\frac{h}{f} = \frac{h'}{q - f}$$

با جایگذاری h' از رابطه‌ی دوم در رابطه‌ی اول بدست می‌آوریم:

$$\frac{q - f}{fq} = \frac{1}{p}$$

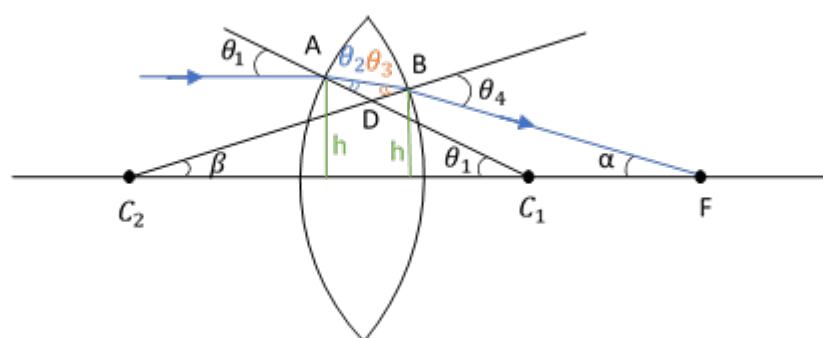
در نتیجه:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

اثبات رابطه‌ی عدسی سازان

عدسی زیر متشکل از دو بخش است. قسمت سمت چپ بخشی از کره‌ای به شعاع R_1 و قسمت سمت راست بخشی از کره‌ای به شعاع R_2 است. پرتویی که موازی با محور اصلی وارد عدسی می‌شود را در نظر می‌گیریم. محل برخورد این پرتو و محور اصلی کانون عدسی است. (چرا؟) در اثبات خود چندین فرض می‌کنیم:

- 1- عدسی بسیار نازک است.
- 2- همه‌ی زوایا کوچک هستند. بطوری که سینوس و تانژانت آنها با خودشان برابر است.



ضریب شکست در هوا و عدسی به ترتیب n_1 و n_2 است. بر اساس قانون شکست اسنل داریم:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

$$n_2 \sin \theta_3 = n_1 \sin \theta_4$$

که با تقریب زوایای کوچک می‌شود:

$$n_1 \theta_1 = n_2 \theta_2 \quad (1)$$

$$n_2 \theta_3 = n_1 \theta_4 \quad (2)$$

چون فرض کردیم عدسی نازک است می‌توان فاصله‌ی نقاط A و B از محور اصلی را یکسان در نظر گرفت. این فاصله را h می‌نامیم. بنابراین:

$$h = R_1 \sin \theta_1 = R_1 \theta_1 \quad (3)$$

$$h = R_2 \sin \beta = R_2 \beta \quad (4)$$

با صرف‌نظر کردن از ضخامت عدسی هم‌چنین می‌توان نوشت:

$$\frac{h}{f} = \tan \alpha = \alpha \quad (5)$$

در مثلث C_2BF ، θ_4 زاویه خارجی است. بنابراین:

$$\theta_4 = \alpha + \beta \quad (6)$$

همچنین با توجه به متقابل‌الراس بودن دو مثلث ABD و C_2DC_1 :

$$\theta_2 + \theta_3 = \theta_1 + \beta \quad (7)$$

با ترکیب روابط (5) و (6) داریم:

$$(8)$$

$$f = \frac{h}{\theta_4 - \beta}$$

و با ترکیب (2) و (7):

$$(9)$$

$$\theta_4 = \frac{n_2}{n_1}(\theta_1 + \beta - \theta_2)$$

با استفاده از (1) و (8) و (9):

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{h} \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) (\theta_1 + \beta)$$

با جایگذاری از روابط (3) و (4):

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_1} \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

اگر ضریب شکست هوا را تقریباً 1 در نظر بگیریم به رابطه‌ی عدسی‌سازان می‌رسیم:

$$\frac{1}{f_\lambda} = (n_\lambda - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

اندیس‌های λ برای تاکید بر وابسته بودن ضریب شکست و فاصله‌ی کانونی به طول‌موج، اضافه شده‌اند.

منابع و مأخذ

1- *Carroll, B. W., & Ostile, D. A., "An Introduction to Modern Astrophysics", second edition, Addison-Wesley Publishing Co., 2007*

2- *Irwin, J. A., "Astrophysics, Decoding the Cosmos", John Wiley & sons Ltd, 2007*

3- *Schroeder, D. J., "Astronomical Optics", second edition, Academic press, 2000*

4- ویکی‌پدیای فارسی و انگلیسی

5- سایت دانشنامه رشد، *daneshnameh.roshd.ir*

6- تعدادی مقاله و سایت دیگر...