



دانشکده فیزیک

# تصحیح تلوریک برای خطوط جذبی در ناحیه مرئی

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک  
گرایش فیزیک نجومی

علی اکبر کاوه‌ای

استاد راهنما

دکتر مهدیار نوربالا

استاد مشاور

دکتر امین فرهنگ‌نیا

بهمن ۱۳۹۹



## تأییدیه‌ی هیأت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان‌نامه

نام دانشکده: دانشکده فیزیک

نام دانشجو: علی اکبر کاوه‌ای

عنوان پایان‌نامه: تصحیح تلوریک برای خطوط جذبی در ناحیه مرئی

تاریخ دفاع: بهمن ۱۳۹۹

رشته: فیزیک

گرایش: فیزیک نجومی

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	مرتبه دانشگاهی	دانشگاه یا مؤسسه	امضا
۱	استاد راهنما	دکتر مه‌دی‌ار نوربالا	استادیار	دانشگاه تهران	
۲	استاد مشاور	دکتر امین فرهنگ‌نیا	استادیار	پژوهشکده دانش‌های بنیادی	
۳	استاد مدعو داخلی	دکتر عطاملک قربان‌زاده	دانشیار	دانشگاه تهران	
۴	استاد مدعو خارجی	دکتر سعید توسلی	استادیار	دانشگاه خوارزمی	

ب

## تأییدیه‌ی صحت و اصالت نتایج

باسمه تعالی

اینجانب علی اکبر کاوه‌ای به شماره دانشجویی ۶۱۰۱۹۶۰۴۸ دانشجوی رشته فیزیک مقطع تحصیلی کارشناسی ارشد تأیید می‌نمایم که کلیه‌ی نتایج این پایان‌نامه حاصل کار اینجانب و بدون هرگونه دخل و تصرف است و موارد نسخه‌برداری شده از آثار دیگران را با ذکر کامل مشخصات منبع ذکر کرده‌ام. در صورت اثبات خلاف مندرجات فوق، به تشخیص دانشگاه مطابق با ضوابط و مقررات حاکم ( قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان و قانون ترجمه و تکثیر کتب و نشریات و آثار صوتی، ضوابط و مقررات آموزشی، پژوهشی و انضباطی ... ) با اینجانب رفتار خواهد شد و حق هرگونه اعتراض در خصوص احقاق حقوق مکتسب و تشخیص و تعیین تخلف و مجازات را از خویش سلب می‌نمایم. در ضمن، مسؤولیت هرگونه پاسخگویی به اشخاص اعم از حقیقی و حقوقی و مراجع ذی‌صلاح (اعم از اداری و قضایی) به عهده‌ی اینجانب خواهد بود و دانشگاه هیچ‌گونه مسؤولیتی در این خصوص نخواهد داشت.

نام و نام خانوادگی: علی اکبر کاوه‌ای

تاریخ و امضا:

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصییم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیاسایم و از ریشه آن‌ها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم چرا که این دو وجود پس از پروردگار مایه هستی‌ام بوده‌اند، دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند.

## تقدیم به پدر و مادر عزیز و مهربانم

که در سختی‌ها و دشواری‌های زندگی همواره یابوری دلسوز و فداکار و پشتیبانی محکم و مطمئن برایم بوده‌اند.

## قدردانی

سپاس خداوندگار حکیم را که با لطف بی‌کران خود، آدمی را زیور عقل آراست.  
در آغاز وظیفه خود می‌دانم از زحمات بی‌دریغ اساتید خود، جناب آقایان دکتر امین فرهنگ‌نیا و دکتر  
مهدیار نوربالا صمیمانه تشکر و قدردانی کنم که قطعاً بدون راهنمایی‌های ارزنده ایشان، این مجموعه به انجام  
نمی‌رسید.

علی اکبر کاوه‌ای

بهمن ۱۳۹۹

## چکیده

زمانی که نور اجرام سماوی از جو زمین عبور کرده و توسط اسپکتروگرافِ تلسکوپ‌های زمینی ثبت می‌گردد، تحت تأثیر جذب‌های گوناگونی از اتمسفر زمین قرار می‌گیرد، جذب‌هایی از قبیل مولکول نیتروژن، اکسیژن، آب و غیره. این در حالی است که منجمان، علاقه‌مند به مطالعه طیف اجرام خارج از جو هستند. یک راه حذف این اثرات، استفاده از تلسکوپ‌های فضایی است؛ اما این کار بسیار هزینه‌بر است و لذا باید دنبال راه دیگری گشت تا از روی زمین آثار مربوط به جو را حذف کرد.

روش سنتی منجمان، استفاده از ستارگان استاندارد است که در طیف آن‌ها عمدتاً تنها آثار هیدروژن وجود دارد و یا در حالاتی خاص استفاده از ستارگانی از نوع رده طیفی G است که شباهت زیادی به خورشید داشته و اثر هیدروژن در طیفشان کمتر بوده و به‌خوبی شناخته‌شده‌اند. به دلایل گوناگون همچون تغییرات آب و هوایی، تابعیت جذب به موقعیت سماوی و غیره، این ستارگان می‌بایست حتماً کمی قبل یا بعد از رصد اصلی و در همان موقعیت سماوی رصد شوند؛ اما این کار زمان‌بر بوده، و به‌صرفه‌تر است که زمان استفاده از تلسکوپ‌های بزرگ، به رصد هدف‌های اصلی اختصاص یابد و آثار جذب جوی را به روش دیگری تصحیح نمود.

روش جایگزین، حل معادلات تابشی با حضور اتم‌ها و مولکول‌های فراوان در درون اتمسفر زمین است. نمونه‌هایی از این معادلات را می‌توان در برنامه‌هایی همچون Molecfit [۱] و SKYCALC [۲] مشاهده کرد. در این برنامه‌ها با استفاده از داده‌های هواشناسی ثبت‌شده، معادلات تابشی حل می‌گردند و با استفاده از گذرهای اتمی، خطوط جذبی و یا نشری اتمسفر زمین مدل می‌گردند. این برنامه‌ها طیف را به‌خوبی اصلاح می‌کنند ولی از معایب آن می‌توان به این مورد اشاره نمود که تصحیح خطوط اتمسفری به دلیل ناشناخته بودن لایه‌های جوی همیشه دقیق نیست.

هدف ما در این پروژه، درک جزئیات نحوه‌ی کارکرد این برنامه و تلاش برای بومی سازی و درنهایت استفاده از آن به‌عنوان یک ابزار برای رصدخانه ملی ایران است.

واژگان کلیدی: انتقال تابشی - اثرات جوی - طیف‌سنجی - رصد - تحلیل داده‌ها

# فهرست مطالب

خ	فهرست تصاویر
۱	فصل ۱: مقدمه
۲	۱-۱ ستارگان استاندارد تلوریک
۶	۲-۱ TelFit (آمریکایی)
۶	۳-۱ Molecfit (اتریشی - آلمانی)
۶	۴-۱ TAPAS (فرانسوی)
۸	فصل ۲: مفاهیم پایه
۸	۱-۲ تعادل تابشی
۸	۲-۲ انتقال تابشی
۹	۱-۲-۲ شدت تابشی خاص
۱۰	۲-۲-۲ انتشار
۱۲	۳-۲-۲ جذب
۱۴	۴-۲-۲ ضرایب انیشتین
۲۱	۵-۲-۲ پراکندگی
۲۲	۶-۲-۲ استخراج عمومی معادله انتقال تابشی
۲۳	۷-۲-۲ جواب‌های معادله انتقال تابشی
۲۴	۸-۲-۲ قانون Lambert-Bouguet-Beer فرمولی برای جذب شار
۲۷	۳-۲ طیف نگار



۲۹	۴-۲ پهن شدگی و جابه‌جایی خطوط طیفی
۳۰	۱-۴-۲ پهن شدگی طبیعی
۳۰	۲-۴-۲ پهن شدگی دوپلری گرمایی
۳۲	۳-۴-۲ پهن شدگی فشاری
۳۳	فصل ۳: روش تصحیح خطوط جوی توسط حل معادلات تابشی
۳۳	۱-۳ جذب ناشی از جو زمین
۳۵	۲-۳ HITRAN
۳۵	۱-۲-۳ پارامترهای HITRAN
۳۸	۲-۲-۳ کاربرد پارامترها
۴۱	۳-۳ جو زمین
۴۱	۱-۳-۳ بخش بندی بر پایه‌ی دما
۴۴	۲-۳-۳ فشار
۴۴	۳-۳-۳ پروفایل‌های جوی
۴۶	۴-۳ LBLRTM
۴۷	۵-۳ روش کار
۵۱	فصل ۴: نمونه‌ی تمرینی
۵۳	۱-۴ مرحله اول: تولید طیف جذب مصنوعی
۵۸	۲-۴ مرحله دوم: تولید زنجیره
۶۰	۳-۴ مرحله سوم: تولید طیف اصلاح شده (به مانند خارج از جو زمین)
۶۲	۴-۴ بررسی اثر متغیرهای آزاد
۶۷	۵-۴ مقایسه کیفیت نتایج تمرین با کیفیت نتایج دیگر برنامه‌ها
۶۹	۶-۴ محدودیت‌ها
۷۰	فصل ۵: بحث و نتیجه‌گیری
۷۱	۱-۵ مقایسه

۷۱ . . . . . ۵-۱-۱ مثال‌هایی برای تصحیح

۷۳ . . . . . ۵-۱-۲ جذب  $H_2O$

۷۵ . . . . . ۵-۱-۳ جذب  $O_2$

۷۷ . . . . . ۵-۲ نتیجه‌گیری

## فهرست تصاویر

- ۱-۱ جذب توسط گازهای جوی . . . . . ۱
- ۲-۱ نمونه‌ای از ستارگان استاندارد تلوریک . . . . . ۳
- ۳-۱ طیف انتقال مصنوعی و طیف ستاره استاندارد تحت سلطه جذب آب. . . . . ۷
- ۴-۱ طیف انتقال مصنوعی و طیف ستاره استاندارد تحت سلطه جذب اکسیژن. . . . . ۷
- ۱-۲ شکل شماتیک برای نمایش پارامترهای موجود در معادله انتقال تابشی . . . . . ۹
- ۲-۲ طیف انتشار هیدروژن . . . . . ۱۰
- ۳-۲ طیف انتشار آهن . . . . . ۱۰
- ۴-۲ انتشار خود به خودی . . . . . ۱۱
- ۵-۲ بررسی اجمالی طیف سنجی . . . . . ۱۲
- ۶-۲ جذب . . . . . ۱۲
- ۷-۲ سه نوع طیف و موقعیت‌هایی که آن‌ها را تولید می‌کند. . . . . ۱۳
- ۸-۲ خطوط انتشار و خطوط جذب نسبت به یک طیف پیوسته . . . . . ۱۴
- ۹-۲ نمودار شماتیک انتشار خودبه‌خودی اتمی . . . . . ۱۶
- ۱۰-۲ نمودار شماتیک انتشار تحریک شده اتمی . . . . . ۱۶
- ۱۱-۲ نمودار شماتیک جذب اتمی . . . . . ۱۷
- ۱۲-۲ نور دایره‌البروجی درخششی ضعیف و پراکنده است که در آسمان شب قابل مشاهده است.  
این پدیده از پراکندگی نور خورشید توسط گرد و غبار بین سیاره‌ای پخش شده در سراسر  
صفحه منظومه شمسی ناشی می‌شود. . . . . ۲۱
- ۱۳-۲ پراکندگی . . . . . ۲۱

- ۲-۱۴ نمودار شماتیک انتقال تابش. . . . . ۲۳
- ۲-۱۵ مسیر خاموشی پرتوی تابش از طریق صفحات جو، موازی با سطح زمین. . . . . ۲۴
- ۲-۱۶ طیف‌نگار ساده . . . . . ۲۷
- ۲-۱۷ شماتیک طیف‌نگارهای جدید با استفاده از توری پراش . . . . . ۲۸
- ۲-۱۸ خطوط طیفی در تئوری و واقعیت . . . . . ۲۹
- ۳-۱ طیف جذب مصنوعی آسمان بین ۰/۳ تا ۳۰ میکرومتر، محاسبه شده با LBLRTM . . . ۳۴
- ۳-۲ شماتیک پارامترهای اساسی یک خط طیفی در HITRAN. پروفایل لورنتزی در این شکل فرض شده است. . . . . ۳۶
- ۳-۳ لایه‌های جو . . . . . ۴۴
- ۳-۴ نمونه‌هایی از پروفیل‌های جوی . . . . . ۴۵
- ۳-۵ دو نمونه از توزیع نسبت مخلوط کردن حجم بخار آب به عنوان تابعی از ارتفاع. . . . ۴۵
- ۳-۶ نمونه‌ای از طیف‌های جذب مصنوعی در شرایط متفاوت . . . . . ۴۶
- ۳-۷ طیف خام ستاره . . . . . ۴۷
- ۳-۸ طیف جذب مصنوعی . . . . . ۴۸
- ۳-۹ درون‌یابی در درون مناطق قرمز . . . . . ۴۸
- ۳-۱۰ منحنی زنجیره . . . . . ۴۹
- ۳-۱۱ آثار جو زمین + خطوطی که تنها شامل آثار خود ستاره می‌باشد. . . . . ۴۹
- ۳-۱۲ سهم مربوط به ستاره، در خطوطی که شاهد تاثیر هم جو و هم ستاره هستیم . . . . . ۵۰
- ۳-۱۳ طیف اصلاح شده . . . . . ۵۰
- ۴-۱ طیف خام ستاره HDV۹۱۸۶ . . . . . ۵۱
- ۴-۲ header فایل fits مربوط به ستاره HDV۹۱۸۶ . . . . . ۵۲
- ۴-۳ محیط برنامه‌ی آنلاین SKYCALC . . . . . ۵۳
- ۴-۴ محیط برنامه‌ی آنلاین SKYCALC . . . . . ۵۴
- ۴-۵ طیف جذب مصنوعی با وضوح ۴۰۰ شبکه . . . . . ۵۵
- ۴-۶ طیف جذب مصنوعی با وضوح ۸۰۰ شبکه . . . . . ۵۵

- ۴-۷ طیف جذب مصنوعی با وضوح ۴۰۰۰ شبکه ۵۶ . . . . .
- ۴-۸ کتابخانه‌های مورد نیاز . . . . . ۵۶
- ۴-۹ ورود داده‌های طیف خام و طیف جذب مصنوعی . . . . . ۵۶
- ۴-۱۰ خواندن و تبدیل داده‌ها به آرایه . . . . . ۵۷
- ۴-۱۱ یکسان‌سازی واحدهای طول موج و مشابه‌سازی آن‌ها . . . . . ۵۷
- ۴-۱۲ مقایسه خطوط تلوریک . . . . . ۵۸
- ۴-۱۳ تبدیل آرایه‌ها به لیست و حذف خطوط تلوریک از طیف خام . . . . . ۵۸
- ۴-۱۴ حذف مناطق بی‌اثر در درونیابی و تولید منحنی زنجیره . . . . . ۵۹
- ۴-۱۵ منحنی زنجیره (درونیابی با چندجمله‌ای درجه ۱) در مقابل طیف خام . . . . . ۵۹
- ۴-۱۶ منحنی زنجیره (درونیابی با چندجمله‌ای درجه ۳) در مقابل طیف خام . . . . . ۶۰
- ۴-۱۷ جداسازی کسرهای انتقال متناظر با طول موج‌های طیف زنجیره . . . . . ۶۰
- ۴-۱۸ رابطه ضرب برای تولید طیفی که در آن آثار جو زمین و خطوطی که تنها شامل آثار خود ستاره می‌باشد. . . . . ۶۱
- ۴-۱۹ برنامه‌ای برای مشخص کردن سهم مربوط به ستاره . . . . . ۶۱
- ۴-۲۰ برنامه‌ای برای مرحله نهایی تولید طیف اصلاح شده و رسم آن به همراه طیف خام . . . . . ۶۱
- ۴-۲۱ طیف اصلاح شده و طیف خام . . . . . ۶۲
- ۴-۲۲ مقایسه طیف اصلاح شده، به وسیله طیف جذب مصنوعی با وضوح ۴۰۰ و ۴۰۰۰ شبکه ۶۳
- ۴-۲۳ طیف اصلاح شده در مقدار حدی کسر انتقال = ۰/۹۷ . . . . . ۶۴
- ۴-۲۴ طیف اصلاح شده در مقدار حدی کسر انتقال = ۰/۹۵ . . . . . ۶۴
- ۴-۲۵ طیف اصلاح شده در مقدار حدی کسر انتقال = ۰/۹۰ . . . . . ۶۵
- ۴-۲۶ انتخاب بزرگترین کسر انتقال ممکن از طیف جذب مصنوعی، برای تولید طیف اصلاح شده ۶۵
- ۴-۲۷ مقایسه طیف اصلاح شده به وسیله چندجمله‌ای درونیاب درجه یک و سه . . . . . ۶۶
- ۴-۲۸ اصلاح Alakfit . . . . . ۶۷
- ۴-۲۹ اصلاح Molecfit . . . . . ۶۸
- ۵-۱ مقایسه پارامترسازی برای مدل‌سازی در روش‌های مختلف اصلاح تلوریک. . . . . ۷۱

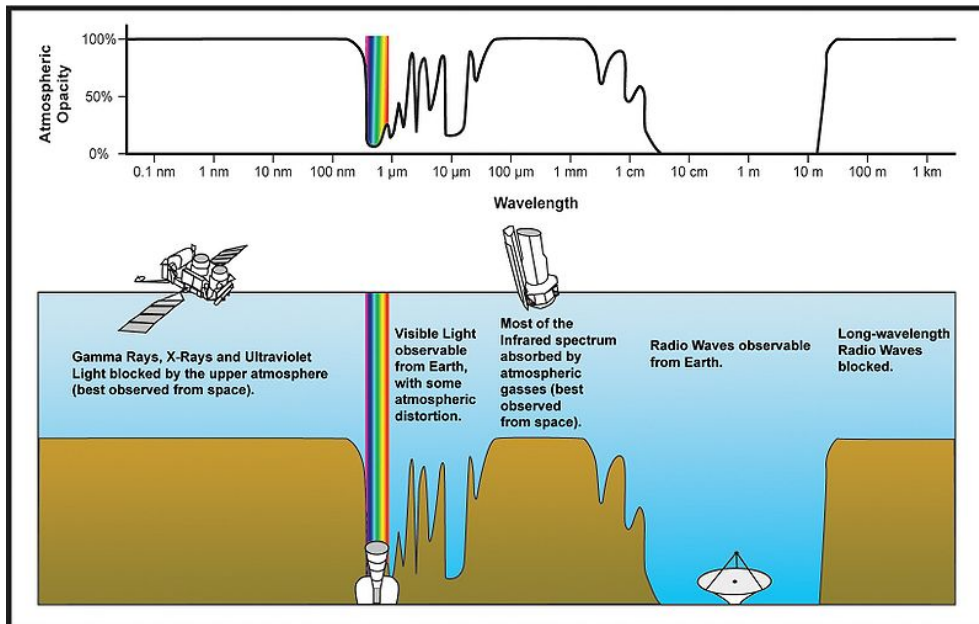
- ۲-۵ طیف ستاره استاندارد با Molecfit اصلاح شده است. بالا: طیف ورودی با رنگ آبی، انتقال اتمسفر Molecfit با رنگ قرمز، طیف اصلاح شده با سبز نشان داده شده است. پایین: باقیمانده‌ای که پس از تفریق انتقال جوی از طیف ورودی بدست می‌آید. . . . . ۷۲
- ۳-۵ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با Molecfit . بالا: طیف ورودی ستاره هدف با رنگ آبی نشان داده شده است، انتقال اتمسفر Molecfit با رنگ قرمز و طیف اصلاح شده با سبز نشان داده شده است. خطوط ستاره‌ای مستثنی به رنگ زرد روشن نشان داده شده‌اند. پایین: باقیمانده بین طیف ورودی و انتقال اتمسفر. خطچین‌ها حدود ۵٪ بالا و پایین را نشان می‌دهند. نقاطی که به خطوط تلوریک تعلق دارند و با خطوط ستاره‌ای مشترک نیستند، به رنگ نارنجی مشخص شده‌اند. . . . . ۷۳
- ۴-۵ میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌های کلیه نقاط به جز خطوط ستاره‌ای برای چهار روش اصلاح تلوریک Molecfit (دایره قرمز)، TelFit (ضربدر آبی) و TAPAS (مربع سبز) و روش ستاره استاندارد تلوریک (مثلث زرد) در محدوده‌ی طول موج تحت سلطه جذب  $H_2O$  . . . . . ۷۴
- ۵-۵ میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌ها در داخل خطوط تلوریک برای چهار روش اصلاح تلوریک در محدوده‌ی طول موج تحت سلطه جذب  $H_2O$  . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۴ است. . . . . ۷۵
- ۶-۵ میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌های کلیه نقاط به جز خطوط ستاره‌ای برای چهار روش تصحیح تلوریک در محدوده‌ی طول موج تحت سلطه جذب  $O_2$  . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۴ است. . . . . ۷۶
- ۷-۵ میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌ها در داخل خطوط تلوریک برای چهار روش اصلاح تلوریک در محدوده‌ی طول موج جذب  $O_2$  . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۴ است. . . . . ۷۶
- ۸-۵ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده‌ی تلوریک با Molecfit . طیف ورودی با رنگ سیاه نشان داده شده است، طیف انتقال جوی با رنگ قرمز و طیف اصلاح شده‌ی تلوریک با رنگ سبز. . . . . ۷۸
- ۹-۵ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با TelFit . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد. . . . . ۷۸

- ۵-۱۰ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با TAPAS . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸  
 می‌باشد. . . . . ۷۹
- ۵-۱۱ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با ستاره استاندارد تلوریک . کد رنگ‌ها همانند  
 شکل ۴-۸ می‌باشد. . . . . ۷۹
- ۵-۱۲ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با Molecfit . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸  
 می‌باشد. . . . . ۸۰
- ۵-۱۳ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با TelFit . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸  
 می‌باشد. . . . . ۸۰
- ۵-۱۴ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با TAPAS . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸  
 می‌باشد. . . . . ۸۱
- ۵-۱۵ نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با ستاره استاندارد تلوریک . کد رنگ‌ها همانند  
 شکل ۴-۸ می‌باشد. . . . . ۸۱

# فصل ۱

## مقدمه

مشاهدات زمینی و به‌ویژه طیف‌سنجی می‌تواند به‌شدت تحت تأثیر جذب ناشی از مولکول‌ها در اتمسفر زمین قرار گیرد. دامنه‌ی طول‌موج‌های متأثر شامل مادون‌قرمز نزدیک و میانه است، اما به این ناحیه محدود نمی‌شود. یک روش استاندارد که برای اصلاح چنین خطوط جذبی به بهترین نحو ممکن برای بازیابی طیف (یا نورسنجی) هدف، مورد استفاده قرار می‌گیرد، این است که سازه در بالای جو قرار داشته باشد، اما این حالت ایده آل به نظر می‌رسد.



شکل ۱-۱: جذب توسط گازهای جوی



رویکردهای مختلف دیگری ارائه شده است، که در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت:

## ۱-۱ ستارگان استاندارد تلوریک

کالیبراسیون داده‌های طیفی در ناحیه فرورسرخ یک روش پیچیده است که نیاز به توجه بسیار دارد. در ناحیه مرئی، از استانداردهای اسپکتروفتومتری<sup>۱</sup> استفاده می‌شود که دارای شار و طول موج جدول بندی شده هستند. در فرورسرخ، چنین استاندارد وجود ندارد. یک سری شبه استاندارد وجود دارد، به این معنا که جداول شار بر حسب طول موج برای برخی از ستاره‌ها وجود دارد. با این حال، شار یا از مدل (برای کوتوله‌های سفید) یا از یک نسخه کوچک از طیف خورشیدی (برای ستارگان خورشیدگون) حاصل می‌شود. این استانداردها برای مأموریت‌های فضایی است و به ویژه در کالیبراسیون داده‌های زمینی مفید نیست.

بارزترین ویژگی در طیف فرورسرخ ویژگی‌های تلوریک جو زمین است. متأسفانه، برخی از خطوط تلوریک با جرم هوا<sup>۲</sup> رابطه خطی ندارند، بنابراین لازم است یک ستاره را که ما آن را ستاره استاندارد تلوریک<sup>۳</sup> می‌نامیم، در همان جرم هوا و با همان تنظیمات سازگار با هدف علمی رصد کنیم. این استاندارد مستقیماً به هدف علمی بستگی دارد. در حالت ایده‌آل، طیف ستاره استاندارد تلوریک باید شناخته شده باشد، بنابراین ویژگی‌های متعلق به آن قابل حذف هستند. با این حال هرگز چنین نیست، بنابراین فرد باید از استانداردهایی استفاده کند که طیف آنها تقریباً مشخص می‌باشد.

به عنوان بخشی از برنامه کالیبراسیون، معمولاً از دو نوع استاندارد تلوریک، ستاره‌های داغ و خورشیدگون استفاده می‌کنیم.

طیف ستاره‌های داغ، گرمتر از رده طیفی B<sup>۴</sup>، نسبتاً بدون ویژگی هستند و به خوبی توسط منحنی‌های جسم سیاه رسم می‌شوند. بنابراین، با دانستن نوع طیفی ستاره، فرد از منحنی جسم سیاه با دمای مناسب، متناسب با منحنی زنجیره<sup>۴</sup> استاندارد، استفاده می‌کند. طیف ستارگانی که از رده طیفی A خنک‌ترند، دارای ویژگی‌های بسیار بیشتری هستند و منحنی جسم سیاه برای طول موج‌های زیر ۱/۶ میکرومتر به خوبی تنظیم نشده است. درست کردن طیف این ستارگان پیچیده تر است. با این حال، برخی از ستاره‌شناسان از آن‌ها برای حذف ویژگی‌های تلوریک استفاده می‌کنند.

<sup>1</sup>Spectrophotometric

<sup>2</sup>Airmass

<sup>3</sup>Telluric Standard Stars

<sup>4</sup>Continuum

متأسفانه، ستاره‌های داغ، برخی از ویژگی‌ها را دارند، معمولاً خطوطی از هیدروژن و هلیوم که حذف آنها دشوار است. اگر منطقه اطراف خطوط هیدروژن و هلیوم مورد توجه باشد، می‌توان یک ستاره نوع خنک‌تر را مشاهده کرد که دارای خطوط هیدروژن و هلیوم ضعیف باشد. سپس از این ستاره برای تصحیح جذب هلیوم و هیدروژن در طیف ستاره داغ استفاده می‌شود. برخی از ستاره‌های داغ نیز دارای خطوط انتشار هستند یا در مناطق گرد و غبار قرار دارند. باید از رصد این ستاره‌ها خودداری کرد.

ستارگان خورشیدگون ستاره‌هایی با نوع طیفی  $G_0V$  تا  $G_4V$  هستند. این استانداردها دارای خطوط جذب زیادی در فرورسرخ، به ویژه در باند J هستند. با تقسیم بر طیف خورشیدی که به وضوح مشاهدات تنزل یافته است، می‌توان ویژگی‌ها را حذف کرد.

مرحله آخر فرآیند کالیبراسیون تنظیم مقیاس شار مطلق است. معمول‌ترین روش استفاده از اندازه باندهای پهن هدف است. [۳]

TELLURIC STANDARD STARS						
OBJECT	Spectral Type	V sin(i)	RA	DEC	EQ.	V
HR0001	A1Vn	195	00:05:10	45:13:45	2000	6.70
HR0007	B9III	153	00:06:26	64:11:46	2000	5.59
HR0026	B9Vn	275	00:10:02	11:08:44	2000	5.51
HR0053	A1Vn	230	00:15:11	27:16:59	2000	6.35
HR0063	A2V	107	00:17:06	38:40:54	2000	4.61
HR0065	O9IIIIn	135	00:17:43	51:25:59	2000	6.14
HR0068	A2V	103	00:18:20	36:47:07	2000	4.52
HR0078	B7V	125	00:20:24	30:56:09	2000	5.90
HR0091	B5IV	230	00:24:16	52:01:12	2000	5.57
HR0093	B9III	154	00:24:48	61:49:52	2000	5.40
HR0096	B9IV	210	00:25:06	53:02:49	2000	5.74
HR0113	B9IIIIn	225	00:30:20	59:58:38	2000	5.94

شکل ۱-۲: نمونه‌ای از ستارگان استاندارد تلوریک

پس یک روش بسیار معمول این است که بلافاصله قبل یا بعد از رصد هدف علمی، یک ستاره داغ چرخان سریع یا یک ستاره نوع G (بسته به هدف خاص) رصد شود. این ستاره تلوریک در حالت ایده آل باید نزدیک به هدف علمی در آسمان واقع شود. در واقع، ستاره‌های نسل اول به دلیل وجود تنها خطوط جذبی هیدروژن، غالباً خطوط جذبی دیگری ندارند و از مزایای بیشتری برخوردار هستند. از طرف دیگر، مناطق طیفی در

طول موج‌های نزدیک به یکی از خطوط هیدروژن، به بهترین وجه توسط ستاره‌های نوع G اصلاح می‌شوند. دلیل نزدیک بودن زمان رصد هدف علمی و ستاره تلوریک، از بین بردن اختلافات ناشی از تغییرات زمانی جو تا حد ممکن است. از طرف دیگر، نیاز به رصد هر دو شیء به صورت زاویه‌ای نزدیک به هم در آسمان، به این خاطر است که خطوط جذب تلوریک اشباع و اشباع نشده با تابع یکسان جرم هوا مقیاس نمی‌خورند. علاوه بر این، توزیع مولکول‌ها در جو (عمدتاً بخار آب) می‌تواند به جهت اشاره بستگی داشته باشد.

رصد چنین ستاره‌های استاندارد تلوریک به زمان تلسکوپ نیاز دارد، زمانی که می‌تواند به رصدهای علمی دیگر اختصاص یابد. این یک عمل ضروری اما پرهزینه است، خصوصاً در خصوص تلسکوپ‌های بسیار بزرگ. هر زمان که یک بازه‌ی زمانی محدود برای رصد در دسترس باشد، رصدهای ستاره‌های تلوریک گاه به‌طور قابل توجهی، از زمان قابل اختصاص به اهداف اصلی علمی می‌کاهند.

کیفیت اصلاح می‌تواند متغیر باشد و به‌طور قابل توجهی به اختلاف جرم هوا بین رصد ستاره و ستاره تلوریک بستگی دارد زیرا در بهترین شرایط، اختلاف ۱٪ در جرم هوا باعث تغییر ۱٪ در عمق نوری خطوط تلوریک **اشباع نشده** می‌شود.

نمونه‌ی دیگری از مشکلات تأثیرگذار بر رصد ستاره‌های تلوریک این است که، ممکن است هیچ ستاره‌ی مناسبی به اندازه کافی نزدیک به هدف علمی برای تصحیح مناسب در دسترس نباشد. در نهایت می‌توان به‌طور خلاصه گفت:

- جنبه‌های مثبت

– اگر تقریباً هم‌زمان انجام شود، اختلاف کوچک جرم هوا ( $>0.01$ ) را خواهیم داشت و در نتیجه تصحیح بسیار خوب انجام خواهد شد، زیرا اثرات ابزاری در نظر گرفته می‌شوند.

- جنبه‌های منفی

– زمان قابل توجهی صرف کالیبراسیون به جای رصد اهداف علمی می‌گردد، به ویژه برای اهداف روشن یا مشاهدات با جرم هوای بزرگ.

– ستاره‌های تلوریک فقط پس از داده‌گاهی می‌توانند به عنوان انتخاب بد مشخص گردند.

– شرایط (مقدار بخار آب، دید نجومی<sup>۵</sup>) می‌تواند بین مشاهدات ستاره و ستاره تلوریک سریع تغییر کند.

<sup>5</sup>Seeing

از سوی دیگر، ظهور کدهای انتقال تابشی در دسترس برای تحقیقات جوی امکان استفاده از طیف‌های انتقال مصنوعی به‌جای ستاره‌های استاندارد تلوریک را فراهم می‌کند. یکی از اولین مقالاتی که توانایی این روش را نشان می‌دهد، (Bailey et al. (۲۰۰۷ [۴] می‌باشد، که از مدل انتقال تابشی SMART [۵] برای این منظور استفاده کرده‌اند. همچنین (Seifahrt et al. (۲۰۱۰ [۶] با روش ترکیب کد انتقال تابشی LBLRTM [۷]، پایگاه داده خط HITRAN [۸]، ترکیبی از داده‌های هواشناسی از منابع مختلف و مدلی از تابع گسترش خطوط جذبی، برای دستیابی به منحنی‌های انتقال مصنوعی استفاده کردند.

TelFit، Molecfit [۹] و TAPAS [۱۰] سه روش اصلاح تلوریک مبتنی بر محاسبه انتقال جوی با کد انتقال تابشی LBLRTM هستند. این کد معادلات انتقال تابشی را با محاسبه سهم هر خط به صورت جداگانه حل می‌کند. کد از پروفایل‌های جو و پارامترهای خط به عنوان ورودی استفاده می‌کند. پروفایل‌های جوی، دما، فشار و مقدار فراوانی مولکول‌ها را به عنوان تابعی از ارتفاع توصیف می‌کند. پارامترهای خط شامل موقعیت، شدت و ضریب گسترش گرفته شده از پایگاه‌های اطلاعاتی طیف سنجی HITRAN هستند.

## ۱-۲. Telfit (آمریکایی)

بسته پایتون Telfit انتقال اتمسفر را مدل‌سازی می‌کند و آن را با الگوریتم Levenberg-Marquardt در یک طیف فیت می‌کند. Telfit می‌تواند منحنی زنجیره را بر روی خطوط تلوریک با عملکرد چند جمله‌ای تنظیم کند. درجه چند جمله‌ای را می‌توان توسط کاربر تنظیم کرد، اما مقادیر ضرایب باید مستقیماً در کد تنظیم شوند. Telfit یک مدل پارامتری از شکل خط را از طریق یک تابع گاوسی ارائه می‌دهد.

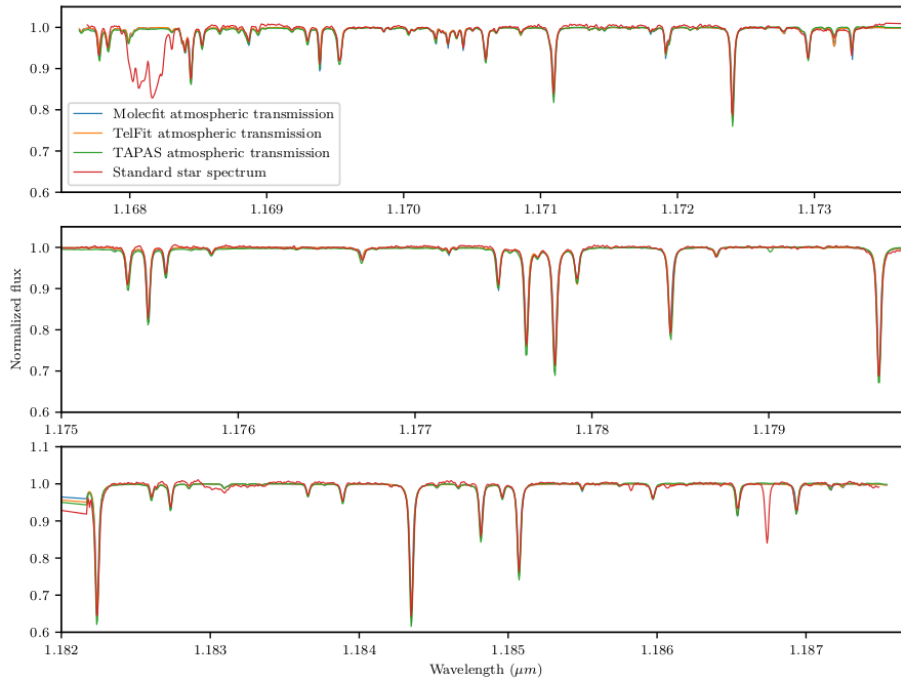
## ۱-۳. Molecfit (اتریشی - آلمانی)

Molecfit برای اصلاح خطوط تلوریک در ناحیه‌ی مرئی و مادون قرمز تولید شده است. همچنین از LBLRTM استفاده می‌کند و مشخصات جوی را در زمان و مکان مشاهدات از مخزن ESO<sup>۶</sup> که به صورت هفتگی به روز می‌شود، به طور خودکار بازیابی می‌کند. با این حال، این مخزن فقط شامل پروفایل‌های جوی برای تعداد محدودی از رصدخانه‌ها است و کاربر باید درخواست کند تا مکان جدیدی را اضافه کند. مشابه Telfit، Molecfit با تنظیم طول موج، منحنی زنجیره، فراوانی مولکولی و شکل خط، مدلی از انتقال جو به طیف مشاهده شده، فیت می‌کند. Molecfit همچنین می‌تواند میزان انتشار پذیری تلسکوپ را تنظیم کند و تعداد بیشتری مولکول را در نظر می‌گیرد. خطوط تلوریک را می‌توان با چندین توابع مدل‌سازی کرد: لورنتزی، گاوسی و غیره.

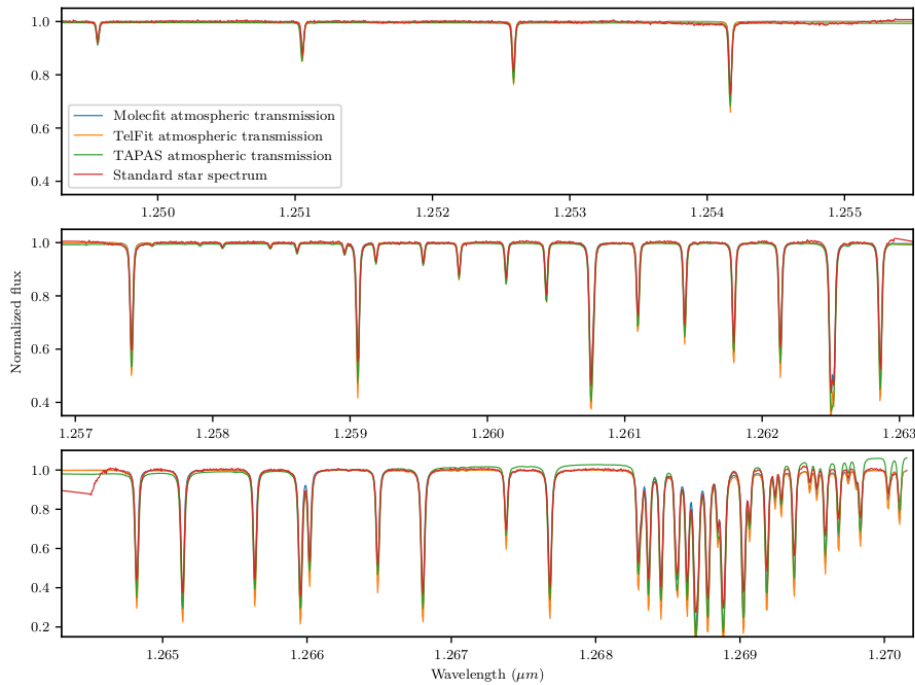
## ۱-۴. TAPAS (فرانسوی)

TAPAS نیز انتقال اتمسفر را با LBLRTM محاسبه می‌کند. با این حال، مشخصات جوی از مرکز اروپا برای پیش بینی آب و هوا با دامنه متوسط (ECMW) گرفته شده است (یک پایگاه داده آب و هوا که هر ۶ ساعت به روز می‌شود). در TAPAS هیچ روش برازش وجود ندارد! شکل‌های ۱-۳ و ۱-۴، طیف‌های استاندارد تلوریک و طیف‌های انتقال مصنوعی بدست آمده با هر یک از این برنامه‌ها را ارائه می‌دهد [۱۱].

<sup>۶</sup>European Southern Observatory



شکل ۱-۳: طیف انتقال مصنوعی و طیف ستاره استاندارد تحت سلطه جذب آب.



شکل ۱-۴: طیف انتقال مصنوعی و طیف ستاره استاندارد تحت سلطه جذب اکسیژن.

## فصل ۲

### مفاهیم پایه

#### ۱-۲ تعادل تابشی

تعادل تابشی یکی از چندین مورد نیاز برای تعادل ترمودینامیکی است، اما در **غیاب تعادل ترمودینامیکی** می‌تواند رخ دهد. تعادل تابشی انواع مختلفی دارد که خود نوعی تعادل دینامیکی است. در انتقال گرما، قانون تابش حرارتی کیرشهف<sup>۱</sup>، به انتشار تابشی خاص طول موج و جذب توسط بدنه‌ی ماده در تعادل ترمودینامیکی، از جمله تعادل تبادل تابشی اشاره دارد. در ادامه قصد داریم، ابتدا مولفه‌های مختلف در بحث تابش را معرفی کرده و در نهایت معادله تعادل تابشی را بدست آوریم.

#### ۲-۲ انتقال تابشی

انتقال تابشی پدیده فیزیکی انتقال انرژی به شکل تابش الکترومغناطیسی است. انتشار اشعه از طریق یک محیط تحت تأثیر فرآیندهای جذب، انتشار و پراکندگی است. معادله انتقال تابشی از نظر ریاضی این تعاملات را توصیف می‌کند. معادلات انتقال تابش در طیف گسترده‌ای از موضوعات از جمله اپتیک، اخترفیزیک، علوم

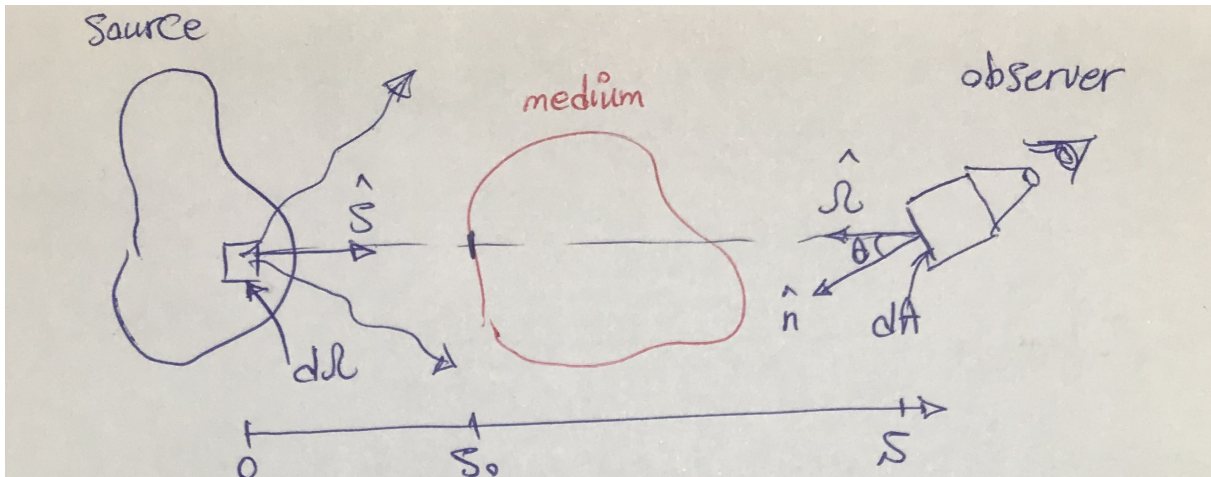
---

<sup>1</sup>Kirchhoff's law of thermal radiation

جوی و سنجش از دور کاربرد دارند. راه حل های تحلیلی برای معادله انتقال تابش<sup>۲</sup> برای موارد ساده وجود دارد اما برای محیط های واقع بینانه تر، با اثرات پیچیده پراکندگی چندگانه، روش های عددی مورد نیاز است.

### ۲-۲-۱ شدت تابشی خاص

کمیت اساسی که یک میدان تابش را توصیف می کند از نظر رادیومتری تابش طیفی نامیده می شود (در سایر زمینه ها اغلب شدت خاص<sup>۳</sup> نامیده می شود). برای یک عنصر بسیار کوچک در میدان تابش، تابش الکترومغناطیسی می تواند در هر جهت فضایی از آن عبور کند. از نظر رادیومتری، عبور می تواند با مقدار انرژی تابش شده در هر جهت فضایی، در واحد زمان، در واحد سطح، در واحد زاویه فضایی در فاصله کاملاً مشخص، در واحد طول موج در نظر گرفته شود (قطبش نادیده گرفته می شود).



شکل ۲-۱: شکل شماتیک برای نمایش پارامترهای موجود در معادله انتقال تابشی

از نظر تابش طیفی،  $I_\nu$  انرژی در حال عبور از عنصر سطح  $dA$ ، واقع در  $\mathbf{r}$ ، در زمان  $dt$ ، در زاویه فضایی  $d\Omega$ ، در جهت  $\hat{\Omega}$  و در فاصله فرکانس  $\nu$  تا  $\nu + d\nu$  است

$$dE_\nu = I_\nu(\mathbf{r}, \hat{\Omega}, t) \cos \theta \, d\nu \, dA \, d\Omega \, dt \quad (1-2)$$

<sup>2</sup>Radiative Transfer Equation

<sup>3</sup>Specific Intensity

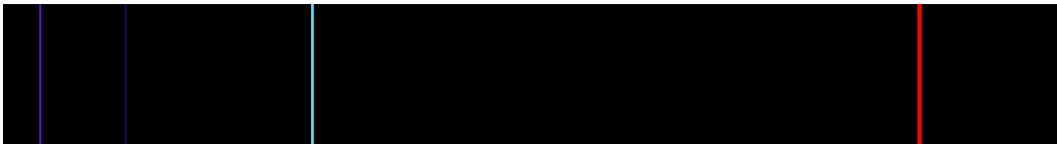


که  $\theta$  زاویه‌ای است که بردار یکه جهت  $\hat{\Omega}$  با بردار عمود بر سطح ایجاد می‌کند. به نظر می‌رسد که واحد تابش طیفی، انرژی بر (زمان.مساحت.زاویه فضایی.فرکانس) است. این در واحدهای MKS برابر با  $Wm^{-2}sr^{-1}Hz^{-1}$  (وات بر متر مربع-استرادیان-هرتز) خواهد بود. شدت متوسط  $J_\nu$  عبارت است از

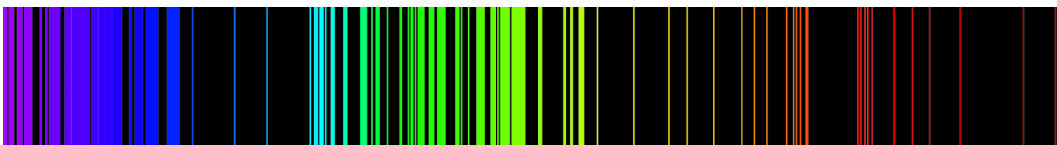
$$J_\nu = \frac{1}{4\pi} \int I_\nu d\Omega \quad (2-2)$$

### ۲-۲-۲ انتشار

طیف نشری<sup>۴</sup> یک عنصر شیمیایی یا ترکیب شیمیایی، طیف فرکانس‌های تابش الکترومغناطیسی است که به دلیل گذار الکترون یک اتم یا مولکول از حالت انرژی زیاد به حالت انرژی پایین‌تر تولید می‌شود. انرژی فوتون ساطع شده برابر با اختلاف انرژی بین دو حالت است. تعداد راه‌های انتقال الکترون برای هر اتم بسیار زیاد است و هر انتقال دارای اختلاف انرژی خاصی است. این مجموعه از انتقال‌های مختلف که منجر به طول موج‌های تابشی مختلفی می‌شود، یک طیف نشری را تشکیل می‌دهد. طیف نشری هر عنصر منحصر به فرد است. بنابراین، می‌توان از طیف‌سنجی برای شناسایی عناصر موجود در ماده‌ای با ترکیب ناشناخته استفاده کرد. به طور مشابه، طیف‌های انتشار مولکول‌ها می‌توانند در تجزیه و تحلیل شیمیایی مواد استفاده شوند.



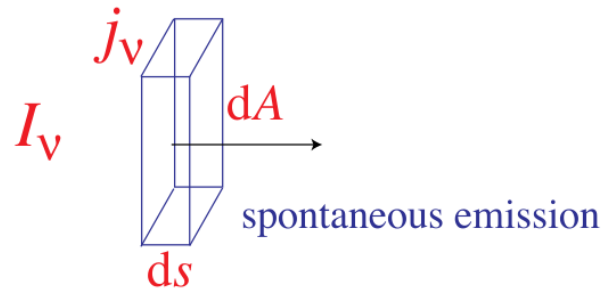
شکل ۲-۲: طیف انتشار هیدروژن



شکل ۲-۳: طیف انتشار آهن

<sup>4</sup>Emission spectrum

- انتشار تحریک شده<sup>۵</sup>: تابش عبوری باعث تحریک ماده به تابش در همان فرکانس و جهت می شود.
- انتشار خود به خودی<sup>۶</sup>: ماده به طور خود به خود فوتون منتشر می کند.



شکل ۲-۴: انتشار خود به خودی

$$dE_{em} = j_\nu dV d\Omega d\nu dt = dI_\nu(\mathbf{r}, \hat{\Omega}, t) dA d\Omega d\nu dt \quad (۳-۲)$$

$$dV = dA ds \quad (۴-۲)$$

در نتیجه، خواهیم داشت

$$j_\nu = \frac{dI_\nu}{ds} \quad (۵-۲)$$

که در آن مقدار انرژی تابش شده است،  $j_\nu$  ضریب انتشار ماکروسکوپی نامیده می شود،  $ds$  المانی از طول مسیر و  $dV$  المانی از حجم است.

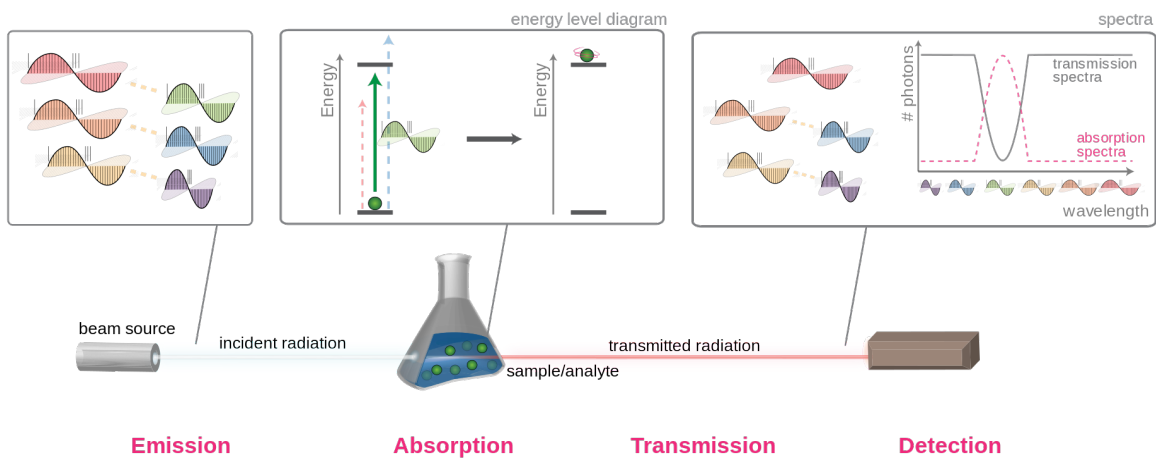
---

<sup>5</sup>Stimulated Emission

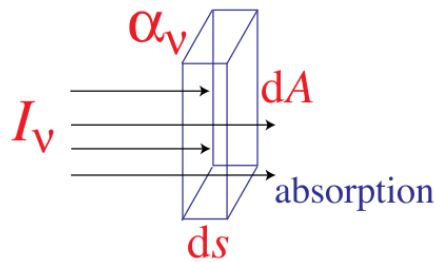
<sup>6</sup>Spontaneous Emission

۲-۲-۳ جذب

جذب<sup>۷</sup> تابش الکترومغناطیسی به این صورت است که ماده (به طور معمول الکترون‌های متصل به اتم‌ها) انرژی فوتون را می‌گیرد و بنابراین انرژی الکترومغناطیسی را به انرژی داخلی جذب تبدیل می‌کند (به عنوان مثال، انرژی گرمایی). یک اثر قابل توجه، (میرایی) کاهش تدریجی شدت امواج نوری در هنگام انتشار از طریق یک محیط است.



شکل ۲-۵: بررسی اجمالی طیف سنجی



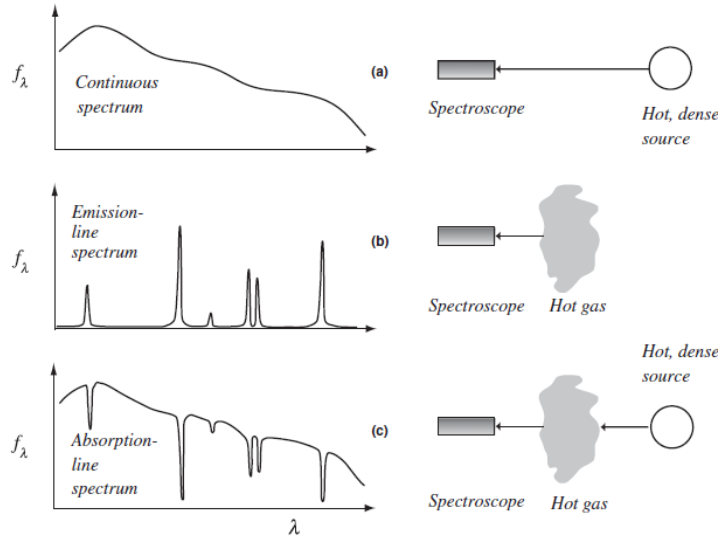
شکل ۲-۶: جذب

با عبور از میان یک ماده، کسر  $\alpha_{\nu,a}$  از تابش، در واحد طول، جذب می‌شود

$$\frac{dI_{\nu}}{I_{\nu}} = -\alpha_{\nu,a} ds \quad (۲-۶)$$

<sup>7</sup>Absorption

جایی که ضریب جذب  $\alpha_{\nu,a}$  نامیده می‌شود.



شکل ۲-۷: سه نوع طیف و موقعیت‌هایی که آن‌ها را تولید می‌کند.

- عمق نوری <sup>۸</sup>: عمق نوری کمیت مهمی است که در تئوری انتقال تابشی استفاده می‌شود و اینگونه تعریف می‌شود

$$\tau_{\nu} \equiv \int \alpha_{\nu,a} ds = \ln\left(\frac{I_{\nu}(s_0)}{I_{\nu}(s)}\right) \quad (7-2)$$

**مثال:** فرض کنید که هم انتشار داریم و هم جذب

$$\frac{dI_{\nu}}{ds} = j_{\nu} - \alpha_{\nu,a} I_{\nu} \quad (8-2)$$

$$\frac{dI_{\nu}}{d\tau_{\nu}} = S_{\nu} - I_{\nu} \quad (9-2)$$

جایی که  $S_{\nu} \equiv \frac{j_{\nu}}{\alpha_{\nu,a}}$  تابع منبع <sup>۹</sup> نامیده می‌شود؛ این معادله انتقال تابشی بدون هیچ گونه پراکندگی است.

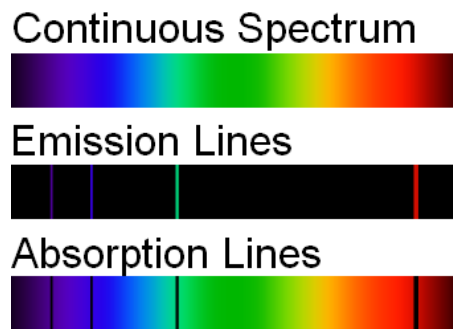
<sup>۸</sup>Optical Depth

<sup>۹</sup>Source function

## ۲-۲-۴ ضرایب انیشتین

ضرایب انیشتین<sup>۱۰</sup> مقادیر ریاضی هستند که احتمال جذب یا انتشار نور توسط یک اتم یا یک مولکول را اندازه‌گیری می‌کنند. ضرایب انیشتین A مربوط به میزان انتشار خودبه‌خودی نور و ضرایب B اینشتین مربوط به جذب و انتشار تحریک‌شده نور است.

- خطوط طیفی: وقتی یک اتم یا مولکول از یک سطح انرژی گسسته خاص  $E_2$  به یک سطح انرژی پایین‌تر  $E_1$  منتقل می‌شود، یک خط نوری ایجاد می‌کند و یک فوتون از یک انرژی و طول موج خاص را ساطع می‌کند.
- هنگامی که یک اتم یا مولکول از انرژی پایین‌تر  $E_1$ ، به یک حالت انرژی گسسته بالاتر  $E_2$  منتقل می‌شود، با جذب یک فوتون، یک خط جذب تشکیل می‌شود. این فوتون‌های جذب شده به‌طور کلی از تابش پیوسته پس‌زمینه (طیف کامل تابش الکترومغناطیسی) هستند. یک طیف جذبی، افت تابش پیوسته را در طول موج مرتبط با فوتون‌های جذب‌شده نشان می‌دهد.
- فوتونی با انرژی برابر با اختلاف  $E_2 - E_1$  بین سطوح انرژی در فرآیند نشر یا جذب وجود دارد. فرکانس  $\nu$  که در آن خط طیفی رخ می‌دهد از رابطه  $h\nu = E_2 - E_1$  بدست می‌آید.



شکل ۲-۸: خطوط انتشار و خطوط جذب نسبت به یک طیف پیوسته

- ضرایب انتشار و جذب: خط طیفی اتمی به رویدادهای انتشار و جذب در گاز گفته می‌شود که در آن  $n_2$  چگالی اتم‌ها در حالت انرژی فوقانی برای خط است و  $n_1$  چگالی اتم‌ها در حالت کم‌انرژی برای خط است.

انتشار تابش خط اتمی در فرکانس  $\nu$  را می‌توان با ضریب انتشار  $j_\nu$  با واحد انرژی بر (حجم.زمان.زاویه

<sup>10</sup>Einstein Coefficients

فضایی) توصیف کرد.  $j_\nu d\Omega dV dt$  انرژی ساطع شده توسط یک عنصر حجمی  $dV$  در زمان  $dt$  به زاویه فضایی  $d\Omega$  است. برای تابش خط اتمی

$$j_\nu = \frac{h\nu}{4\pi} n_2 A_{21} \quad (10-2)$$

که در آن  $A_{21}$  ضریب انیشتین برای انتشار خودبه‌خود است، که توسط خواص ذاتی اتم مربوطه برای دو سطح انرژی مربوطه، ثابت می‌شود.

خط جذب تابش اتمی را می‌توان با ضریب جذب  $\alpha_{\nu,a}$  با واحد طول / ۱ توصیف کرد. عبارت  $\alpha_{\nu,a} ds$  کسری از شدت جذب شده برای یک پرتوی نور را در فرکانس  $\nu$  در حالی که مسافت  $ds$  را طی می‌کند، می‌دهد. ضریب جذب توسط رابطه زیر داده می‌شود

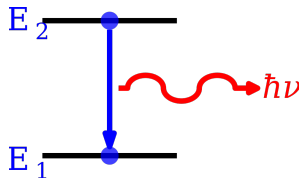
$$\alpha_{\nu,a} = \frac{h\nu}{4\pi} (n_1 B_{12} - n_2 B_{21}) \quad (11-2)$$

که  $B_{21}$  و  $B_{12}$  به ترتیب ضرایب انیشتین برای جذب فوتون و نشر القایی هستند. مانند ضریب  $A_{21}$ ، این‌ها نیز توسط خواص ذاتی اتم مربوطه برای دو سطح انرژی مربوطه، ثابت می‌شوند.

در سال ۱۹۱۶، آلبرت انیشتین پیشنهاد کرد که سه روند در تشکیل یک خط طیفی اتمی رخ می‌دهد. سه فرآیند تحت عنوان انتشار خودبه‌خودی، انتشار تحریک شده و جذب نامیده می‌شوند. هر یک با ضریب انیشتین همراه است، که معیاری برای احتمال وقوع آن فرآیند خاص است. انیشتین مورد تابش همسانگرد فرکانس  $\nu$  و چگالی انرژی طیفی  $\rho(\nu)$  را در نظر گرفت.

● انتشار خودبه‌خودی: انتشار خودبه‌خودی زمانی است که یک الکترون "خودبه‌خود" (یعنی بدون هیچ گونه تأثیر خارجی) از سطح انرژی بالاتر به سطح پایین‌تر می‌رود. ضریب انیشتین  $A_{21}$  فرآیند را توصیف می‌کند، که این احتمال را در واحد زمان می‌دهد که یک الکترون در حالت ۲ با انرژی  $E_2$  خودبه‌خود به حالت ۱ با انرژی  $E_1$  می‌رود، و یک فوتون با انرژی  $h\nu = E_2 - E_1$  منتشر می‌کند. تغییر در تراکم تعداد اتم‌ها در حالت ۲ در واحد زمان به دلیل انتشار خودبه‌خودی خواهد بود:

$$\left( \frac{dn_2}{dt} \right)_{\text{spontaneous}} = -A_{21} n_2 \quad (12-2)$$

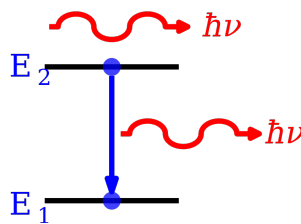


شکل ۲-۹: نمودار شماتیک انتشار خودبه‌خودی اتمی

همین روند منجر به افزایش جمعیت حالت ۱ می‌شود:

$$\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{\text{spontaneous}} = A_{21}n_2 \quad (۱۳-۲)$$

- انتشار تحریک شده: انتشار تحریک شده (همچنین به عنوان انتشار القایی شناخته می‌شود) فرایندی است که در آن الکترون با حضور تابش الکترومغناطیسی در فرکانس انتقال (یا نزدیک) به آن، از سطح انرژی بالاتر به پایین‌تر می‌پرد. از نظر ترمودینامیکی، این فرآیند باید به عنوان جذب منفی در نظر گرفته شود. این فرایند با ضریب انیشتین  $B_{21}$  توصیف می‌شود، که این احتمال را در واحد زمان در واحد تابش طیفی از میدان تابشی می‌دهد که یک الکترون در حالت ۲ با انرژی  $E_2$  به حالت ۱ با انرژی  $E_1$  رفته، و یک فوتون با انرژی  $h\nu = E_2 - E_1$  منتشر کند.



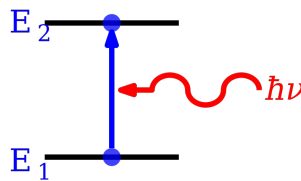
شکل ۲-۱۰: نمودار شماتیک انتشار تحریک شده اتمی

تغییر در تراکم تعداد اتم‌ها در حالت ۱ در واحد زمان به دلیل انتشار تحریک شده خواهد بود:

$$\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{\text{neg. absorb.}} = B_{21}n_2\rho(\nu) \quad (۱۴-۲)$$

- جذب فوتون: جذب فرآیندی است که طی آن یک فوتون توسط اتم جذب می‌شود و باعث می‌شود

الکترون از سطح انرژی پایین‌تر به یک سطح بالاتر بپرد. این فرآیند با ضریب انیشتین  $B_{12}$  توصیف می‌شود، که این احتمال را در واحد زمان در واحد تابش طیفی میدان تابشی می‌دهد، که یک الکترون در حالت ۱ با انرژی  $E_1$  یک فوتون با انرژی  $E_2 - E_1$  را جذب می‌کند و به حالت ۲ با انرژی  $E_2$  می‌رود.



شکل ۲-۱۱: نمودار شماتیک جذب اتمی

تغییر در چگالی تعداد اتم‌ها در حالت ۱ در واحد زمان به دلیل جذب:

$$\left(\frac{dn_1}{dt}\right)_{\text{pos. absorb.}} = -B_{12}n_1\rho(\nu) \quad (15-2)$$

- جزئیات متعادل‌سازی: در تعادل ترمودینامیکی، یک تعادل ساده خواهیم داشت. تغییر خالص تعداد اتم‌های تحریک شده صفر است، که در نتیجه از دست دادن و بدست آوردن ناشی از تمام فرآیندها متعادل است. تعادل دقیق مستلزم آن است که تغییرات زمانی تعداد اتم‌ها در سطح ۱ به دلیل سه فرآیند فوق صفر باشد:

$$0 = A_{21}n_2 + B_{21}n_2\rho(\nu) - B_{12}n_1\rho(\nu) \quad (16-2)$$

همراه با توازن دقیق در دمای  $T$ ، از دانش خود در مورد توزیع انرژی تعادلی اتم‌ها، همانطور که در توزیع ماکسول-بولتزمن<sup>۱۱</sup> و توزیع تعادلی فوتون‌ها که در قانون پلانک در مورد تابش جسم سیاه<sup>۱۲</sup> آمده است برای روابط بین ضرایب انیشتین استفاده می‌کنیم.

<sup>۱۱</sup>Maxwell-Boltzmann distribution

<sup>۱۲</sup>Planck's law of black body radiation



از توزیع بولتزمن برای تعداد اتم‌های برنگیخته‌ی گونه  $i$  داریم:

$$\frac{n_i}{n} = \frac{g_i e^{-E_i/kT}}{Z} \quad (۱۷-۲)$$

که  $n$  چگالی تعداد کل گونه‌های اتمی، تحریک شده و غیرتحریک شده است،  $k$  ثابت بولتزمن است،  $T$  دما است،  $g_i$  تبهگنی حالت  $i$  است و  $Z$  تابع پارش است. از قانون پلانک در مورد تابش جسم سیاه در دمای  $T$ ، ما تابش طیفی (تابش، انرژی در واحد زمان در واحد زاویه فضایی در واحد سطح عمود، هنگام ادغام در یک فاصله فرکانسی مناسب است) را در فرکانس  $\nu$  داریم

$$\rho_\nu(\nu, T) = F(\nu) \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (۱۸-۲)$$

که

$$F(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^3} \quad (۱۹-۲)$$

و  $c$  سرعت نور و  $h$  ثابت پلانک است.

جایگزینی این عبارات در معادله تعادل و یادآوری  $h\nu = E_2 - E_1$  نتیجه زیر را خواهد داد

$$A_{21}g_2 e^{-h\nu/kT} + B_{21}g_2 e^{-h\nu/kT} \frac{F(\nu)}{e^{h\nu/kT} - 1} = B_{12}g_1 \frac{F(\nu)}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (۲۰-۲)$$

که قابل تبدیل به رابطه زیر می‌باشد

$$A_{21}g_2(e^{h\nu/kT} - 1) + B_{21}g_2 F(\nu) = B_{12}g_1 e^{h\nu/kT} F(\nu) \quad (۲۱-۲)$$

معادله فوق باید در هر دمایی برقرار باشد، بنابراین

$$A_{21}g_2 = B_{12}g_1 F(\nu) \quad (۲۲-۲)$$

و

$$-A_{21}g_2 + B_{21}g_2F(\nu) = 0 \quad (23-2)$$

بنابراین، سه ضریب انیشتین با روابط زیر با هم مرتبط هستند

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = F(\nu) \quad (24-2)$$

و

$$\frac{B_{21}}{B_{12}} = \frac{g_1}{g_2} \quad (25-2)$$

هنگامی که این روابط در معادله اصلی وارد می شوند، می توان رابطه‌ی بین  $A_{21}$  و  $B_{12}$  را پیدا کرد.

قدرت نوسانگر<sup>۱۳</sup>  $f_{12}$  با رابطه زیر با سطح مقطع جذب<sup>۱۴</sup>  $\sigma(\nu)$  تعریف می شود:

$$\sigma(\nu) = \frac{e^2}{4\epsilon_0 m_e c} \frac{\gamma}{(\nu - \nu_0)^2 + (\gamma/2)^2} f_{12} \quad (26-2)$$

که در آن

$$\sigma(\nu) = \alpha_{\nu,a}/n \quad (27-2)$$

و

$$\gamma = \frac{e^2 \nu_0^2}{6\pi m_e \epsilon_0 c^3} f_{12} \quad (28-2)$$

<sup>13</sup>Oscillator strength<sup>14</sup>Absorption cross section

و در کلاسیک

$$f_{12} = \left(\frac{m_e}{m}\right) \left(\frac{q}{e}\right)^2 \quad (29-2)$$

و در کوانتوم

$$f_{12} = \frac{2m_e\nu_0 P^2}{3\hbar e^2} \quad (30-2)$$

می‌باشد. همچنین  $e$  بار الکترون،  $m_e$  جرم الکترون،  $q$  بار دو قطبی،  $m$  جرم اتم،  $n$  چگالی عددی اتمی و  $P$  گشتاور دو قطبی الکتریکی است [۱۲]. این اجازه می‌دهد تا هر سه ضریب انیشتین بر اساس قدرت نوسانگر منفرد مرتبط با خط طیفی اتمی خاص بیان شود:

$$B_{12} = \frac{e^2}{4\varepsilon_0 m_e h \nu} f_{12} \quad (31-2)$$

$$B_{21} = \frac{e^2}{4\varepsilon_0 m_e h \nu} \frac{g_1}{g_2} f_{12} \quad (32-2)$$

$$A_{21} = \frac{2\pi\nu^2 e^2}{\varepsilon_0 m_e c^3} \frac{g_1}{g_2} f_{12} \quad (33-2)$$

همچنین از مکانیک کوانتوم، می‌بینیم که [۱۳]

$$B_{21} = \frac{\pi P^2}{3\varepsilon_0 \hbar^2} \quad (34-2)$$

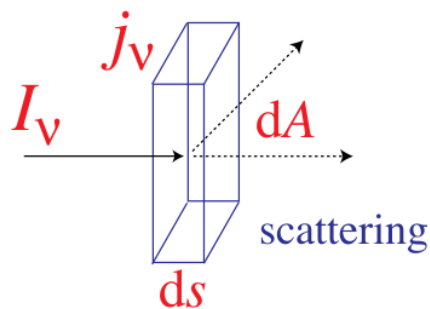
در نتیجه با استفاده از روابط ۲- (۱۰، ۱۱، ۲۸ یا ۲۹، ۳۱، ۳۲، ۳۳) ضرایب انتشار و جذب را می‌توان تعیین نمود.

## ۲-۲-۵ پراکندگی

اتم‌ها یا مولکول‌های در معرض نور، انرژی نور را جذب می‌کنند و در جهات مختلف و با شدت‌های مختلف نور را دوباره ساطع می‌کنند. این پدیده نمونه‌ای از پراکندگی<sup>۱۵</sup> است، یک روند کلی فیزیکی که در آن کوانتاهای برخی از اشکال، مانند نور، صدا یا ذرات متحرک، مجبور می‌شوند با یک محیط غیر یکنواخت موضعی که از آن عبور می‌کنند، از یک مسیر مستقیم منحرف شوند. در استفاده معمول، این شامل انحراف تابش منعکس شده از زاویه پیش‌بینی شده توسط قانون بازتاب است. بازتاب تابش‌هایی که تحت پراکندگی قرار می‌گیرند، اغلب بازتاب‌های منتشر و بازتاب‌های غیر پراکنده را بازتاب‌های خاص (آینه مانند) می‌نامند.



شکل ۲-۱۲: نور دایره‌البروجی درخششی ضعیف و پراکنده است که در آسمان شب قابل مشاهده است. این پدیده از پراکندگی نور خورشید توسط گرد و غبار بین سیاره‌ای پخش شده در سراسر صفحه منظومه شمسی ناشی می‌شود.



شکل ۲-۱۳: پراکندگی

<sup>15</sup>Scattering

• پراکندگی را می‌توان به عنوان جذب و انتشار در نظر گرفت که انتشار مستقیماً با جذب متناسب است:

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + J_\nu = -I_\nu + \frac{1}{4\pi} \int I_\nu d\Omega \quad (۳۵-۲)$$

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_{\nu,s} I_\nu + \frac{\alpha_{\nu,s}}{4\pi} \int I_\nu d\Omega \quad (۳۶-۲)$$

جایی که عبارت  $\frac{\alpha_{\nu,s}}{4\pi} \int I_\nu d\Omega$  بیانگر تابش پراکنده از جهات دیگر به سطح است.

## ۲-۲-۶ استخراج عمومی معادله انتقال تابشی

معادله انتقال تابشی بیان ریاضی از بقای انرژی تابشی است. ما فرض می‌کنیم که تابش با شدت  $I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t)$  در فاصله فرکانسی  $d\nu$ ، در زمان  $dt$  از طریق المانی از طول  $ds$  و سطح مقطع  $d\sigma$  عمود به جهت اشعه به زاویه فضایی  $d\omega$  عبور می‌کند (شکل ۲-۱۳ را ببینید).

شدت تابشی در مکان  $r + \Delta r$  و زمان  $t + dt$  را  $I_\nu(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, \Omega, t + dt)$  در نظر بگیرید. این انرژی تفاوت بین انرژی جذب شده و انرژی ساطع شده در عنصر حجم است، بنابراین،

$$\begin{aligned} & [I_\nu(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, \Omega, t + \Delta t) - I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t)] d\sigma d\omega d\nu dt \\ & = [j_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) - \alpha_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t)] ds d\sigma d\omega d\nu dt \end{aligned} \quad (۳۷-۲)$$

که در آن  $j_\nu$  و  $\alpha_\nu$  به ترتیب ضرایب انتشار و جذب هستند.

$s$  طول مسیری است که توسط اشعه از این عنصر حجم پیموده می‌شود، لذا  $\Delta t = \Delta s/c$  و

$$I_\nu(\mathbf{r} + \Delta\mathbf{r}, \Omega, t + \Delta t) - I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) = \left( \frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \frac{\partial I_\nu}{\partial s} \right) ds \quad (۳۸-۲)$$

$c$  سرعت نور است. از معادلات (۲-۲۹) و (۲-۳۰)، معادله انتقال تابشی را بدست می‌آوریم:

$$\left( \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial s} \right) I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) = j_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) - \alpha_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) I_\nu(\mathbf{r}, \Omega, t) \quad (۳۹-۲)$$



شکل ۲-۱۴: نمودار شماتیک انتقال تابش.

در سیستم مختصات دکارتی، مشتق  $\frac{\partial}{\partial s}$  را می‌توان به صورت زیر نوشت

$$\frac{\partial I_\nu}{\partial s} = \left(\frac{\partial x}{\partial s}\right) \left(\frac{\partial I_\nu}{\partial x}\right) + \left(\frac{\partial y}{\partial s}\right) \left(\frac{\partial I_\nu}{\partial y}\right) + \left(\frac{\partial z}{\partial s}\right) \left(\frac{\partial I_\nu}{\partial z}\right) = \hat{\Omega} \cdot \nabla I_\nu \quad (۴۰-۲)$$

معادله انتقال تابشی می‌گوید که هرگونه پرتوی تابش، انرژی را با جذب از دست می‌دهد، با فرآیند انتشار انرژی به دست می‌آورد و با پراکندگی دوباره توزیع انرژی می‌کند. بنابراین با در نظر گرفتن پراکندگی فرم دیفرانسیلی برای معادله نهایی انتقال تابشی به این شکل می‌باشد [۱۴]:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial I_\nu}{\partial t} + \hat{\Omega} \cdot \nabla I_\nu + (\alpha_{\nu,a} + \alpha_{\nu,s}) I_\nu = j_\nu + \frac{\alpha_{\nu,s}}{4\pi} \int I_\nu d\Omega \quad (۴۱-۲)$$

## ۲-۲-۷ جواب‌های معادله انتقال تابشی

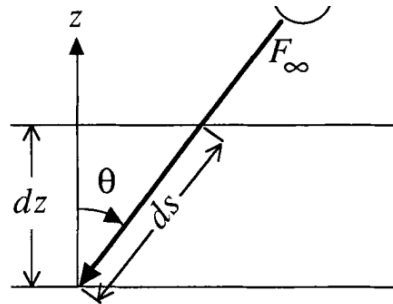
جواب‌های معادله انتقال تابشی مجموعه عظیمی را تشکیل می‌دهد. این اختلافات، اساساً به اشکال مختلف ضرایب انتشار و جذب مربوط می‌شود. اگر پراکندگی نادیده گرفته شود، یک جواب کلی حالت پایدار بر حسب ضرایب انتشار و جذب، عبارت است:

$$I_\nu(\tau_\nu) = I_\nu(0)e^{-\tau_\nu} + \int_0^{\tau_\nu} S_\nu(\tau'_\nu) e^{-(\tau_\nu - \tau'_\nu)} d\tau'_\nu \quad (۴۲-۲)$$

جایی که اولین عبارت دست راست نور پس زمینه است و عبارت دوم یک محیط درخشان است [۱۵].

## ۲-۲-۸ قانون Lambert-Bouguer-Beer فرمولی برای جذب شار

- ما پراکندگی را نادیده خواهیم گرفت و همچنین در نظر خواهیم گرفت که جو فقط می‌تواند تابش را منتقل یا جذب کند.
- برای بسیاری از کاربردها، تقریب صفحات موازی دقیق است و محاسبات انتقال تابشی را بسیار ساده می‌کند. تحت این تقریب، کروی بودن کره زمین نادیده گرفته می‌شود و خواص جوی فقط تابع مختصات عمودی فرض می‌شوند. شار و تغییرات آن را اینگونه تعریف می‌کنیم:



شکل ۲-۱۵: مسیر خاموشی پرتوی تابش از طریق صفحات جو، موازی با سطح زمین.

$$F_{\nu} = \int I_{\nu} \cos \theta d\Omega \quad (۴۳-۲)$$

$$dF_{\nu} = -\alpha_{\nu,a} \rho_a F_{\nu} ds \quad (۴۴-۲)$$

- به طور کلی،  $\alpha_{\nu,a}$  به فشار و دما بستگی دارد.

طول مسیر پیموده شده با رابطه زیر به ارتفاع مربوط می‌شود

$$dz = \cos \theta ds \quad (۴۵-۲)$$

از این رو

$$\cos \theta \frac{dF_\nu}{dz} = -\alpha_{\nu,a} \rho_a F_\nu \quad (۴۶-۲)$$

ما می‌توانیم عمق نوری را در امتداد یک مسیر عمودی تعریف کنیم،

$$d\tau_\nu = \alpha_{\nu,a} \rho_a dz \quad (۴۷-۲)$$

$$d\tau_\nu = \alpha_{\nu,a} \rho M_a dz \quad (۴۸-۲)$$

که در آن  $M_a = \rho_a / \rho$  نسبت اختلاط جرمی<sup>۱۶</sup> جاذب است. برای یک گاز ایده آل، فشار ( $P$ )، چگالی ( $\rho$ ) و دما ( $T$ ) با فرمول زیر مرتبط هستند

$$P = \rho RT \quad (۴۹-۲)$$

که  $R = 287 JK^{-1} kg^{-1}$  ثابت گازها است، بنابراین

$$d\tau_\nu = \frac{\alpha_{\nu,a} M_a P}{RT} dz \quad (۵۰-۲)$$

$$\tau_\nu \equiv \int_z^\infty \frac{\alpha_{\nu,a} M_a P}{RT} dz \quad (۵۱-۲)$$

در نتیجه می‌توانیم بنویسیم

$$\cos \theta \frac{dF_\nu}{d\tau_\nu} = -F_\nu \quad (۵۲-۲)$$

<sup>۱۶</sup>Mass Mixing Ratio



این معادله یک جواب ساده دارد،

$$F_\nu = F_\nu(\infty)e^{-\tau_\nu/\cos\theta} \quad (۵۳-۲)$$

که  $F_\nu(\infty)$  در این حالت، شار رو به پایین در بالای جو است. بنابراین شار در امتداد مسیر مایل  $ds$  در جایی که عمق نوری توسط  $\tau_\nu/\cos\theta$  داده می‌شود، به طور نمایی کاهش می‌یابد [۱۶].

## ۲-۳ طیف نگار

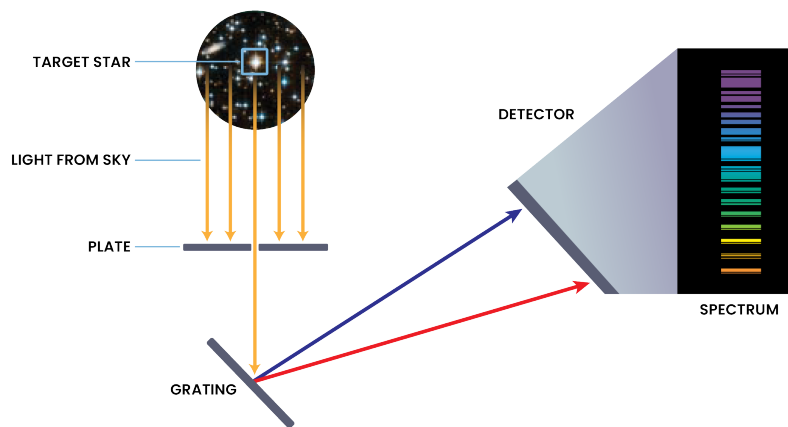
طیف‌نگار<sup>۱۷</sup> ابزاری است که طول موج‌های نور را جدا کرده و این داده‌ها را ثبت می‌کند. یک طیف‌نگار معمولاً دارای یک سیستم یا دوربین آشکارساز چند کاناله است که طیف نور را تشخیص و ثبت می‌کند. این اصطلاح اولین بار در سال ۱۸۷۶ توسط دکتر هنری دراپر<sup>۱۸</sup> هنگامی که اولین نسخه از این دستگاه را اختراع و از آن برای گرفتن عکس‌های مختلف از طیف وگا<sup>۱۹</sup> بکار برد، استفاده شد. استفاده از این نسخه اولیه از طیف‌نگار طاقت فرسا و مدیریت آن دشوار بود.



شکل ۲-۱۶: طیف‌نگار ساده

<sup>17</sup>Spectrograph<sup>18</sup>Dr. Henry Draper<sup>19</sup>Vega

بسته به ماهیت دقیق امواج، انواع مختلفی از ماشین‌ها وجود دارد که به آنها طیف‌نگار گفته می‌شود. اولین طیف‌نگارها از کاغذ عکاسی به عنوان آشکارساز استفاده می‌کردند. فیتوکروم رنگدانه گیاه با استفاده از طیف‌سنجی که از گیاهان زنده به عنوان آشکارساز استفاده می‌کرد، کشف شد. طیف‌نگارهای جدیدتر از آشکارسازهای الکترونیکی مانند CCD<sup>۲۰</sup> استفاده می‌کنند که می‌توانند برای نور مرئی و اشعه ماورابنفش استفاده شوند. انتخاب دقیق آشکارساز به طول‌موج‌های نوری که باید ثبت شود بستگی دارد.



شکل ۲-۱۷: شماتیک طیف‌نگارهای جدید با استفاده از توری پراش

طبقه‌بندی طیفی ستاره‌ها<sup>۲۱</sup> و کشف رشته اصلی<sup>۲۲</sup>، قانون هابل<sup>۲۳</sup> و نتیجه هابل همه با طیف‌نگاری به دست آمده‌اند که از کاغذهای عکاسی استفاده می‌کردند. تلسکوپ فضایی جیمز وب<sup>۲۴</sup> در آینده شامل دو طیف‌نگار نزدیک به مادون قرمز (NIRSpec) و مادون قرمز (MIRI) خواهد بود.

<sup>20</sup>Charge-coupled device

<sup>21</sup>Spectral Classification

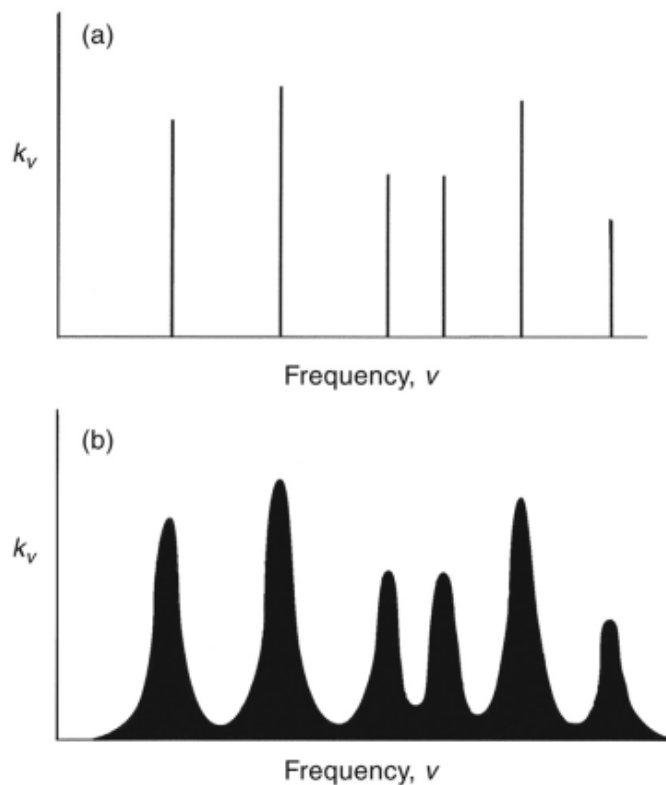
<sup>22</sup>Main Sequence

<sup>23</sup>Hubble's law

<sup>24</sup>James Webb Space Telescope

## ۲-۴ پهن‌شدگی و جابه‌جایی خطوط طیفی

چندین اثر شکل خط طیفی را کنترل می‌کند. یک خط طیفی در یک دامنه فرکانس گسترش می‌یابد، نه یک فرکانس (پهنای غیر صفر دارد). علاوه بر این، مرکز آن ممکن است از طول موج مرکزی اسمی خود منتقل شود. دلایل مختلفی برای این پهن‌شدگی و جابه‌جایی وجود دارد. این دلایل را می‌توان به دو دسته کلی تقسیم کرد: گسترش به دلیل شرایط محلی و گسترش به دلیل شرایط طولانی. گسترش به دلیل شرایط محلی به دلیل تأثیراتی است که در یک منطقه کوچک در اطراف عنصر ساطع کننده وجود دارد، معمولاً به اندازه کافی کوچک برای اطمینان از تعادل ترمودینامیکی محلی. گسترش به دلیل شرایط طولانی ممکن است در اثر تغییر در توزیع طیفی تابش هنگامی که مسیر خود را به سمت ناظر طی می‌کند، ایجاد شود. همچنین ممکن است از ترکیب تابش تعدادی از مناطق دور از یکدیگر حاصل شود. در ادامه به بررسی سه اثر محلی بر پهن‌شدگی خواهیم پرداخت.



شکل ۲-۱۸: خطوط طیفی در تئوری و واقعیت

## ۲-۴-۱ پهن‌شدگی طبیعی

طول عمر حالت‌های برانگیخته منجر به پهن‌شدگی طبیعی می‌شود، همچنین به عنوان پهن‌شدگی طول عمر شناخته می‌شود. اصل عدم قطعیت مربوط به طول عمر یک حالت برانگیخته (به دلیل تنزل تابش خود به خودی) با عدم قطعیت انرژی آن است. یک عمر کوتاه، یک عدم قطعیت بزرگ انرژی و یک انتشار گسترده را در پی خواهد داشت. این پهن‌شدگی منجر به پروفایل لورنتزی<sup>۲۵</sup> جابه‌جا نشده می‌شود.

این پهن‌شدگی در حالت کلی، بسیار ناچیز و قابل صرف نظر می‌باشد.

## ۲-۴-۲ پهن‌شدگی دوپلری گرمایی

پهن‌شدگی دوپلری در فیزیک اتمی به معنای پهن شدن خطوط طیفی به دلیل اثر دوپلر و توزیع سرعت اتم‌ها یا مولکول‌هاست. سرعت‌های متفاوت ذرات منجر به شیفت‌های دوپلری متفاوت می‌شود و مجموع این شیفت‌ها به پهن‌شدگی دوپلری منجر می‌شوند.

یک نمونه خاص، پهن‌شدگی دوپلری گرمایی به دلیل حرکت گرمایی ذرات است، در نتیجه این پهن‌شدگی فقط وابسته به فرکانس، جرم ذرات گسیل‌کننده و دما می‌باشد، پس می‌تواند برای اندازه‌گیری دمای یک جسم گسیل‌کننده استفاده شود.

وقتی حرکت گرمایی موجب حرکت ذره به سمت مشاهده‌گر شود، تابش گسیلی به فرکانس بیشتری شیفت پیدا می‌کند و به همین ترتیب اگر ذره دور شود فرکانس کمتر خواهد شد. برای سرعت‌های غیر نسبیتی شیفت دوپلری در فرکانس به صورت زیر خواهد بود:

$$f = f_0 \left( 1 + \frac{v}{c} \right) \quad (2-54)$$

جایی که  $f$  فرکانس مشاهده شده توسط ناظر،  $f_0$  فرکانس گسیلی از ذره،  $v$  سرعت ذره نسبت به ناظر و  $c$  سرعت نور است. چون یک توزیع سرعت برای ذرات موجود در یک محفظه‌ی گازی با حجم  $V$  وجود دارد، پس شیفت فرکانسی به ازای هر سرعت، منجر به یک پهن‌شدگی در طیف گسیلی می‌شود.

<sup>25</sup>Lorentzian profile

اگر  $P_v(v) dv$  کسری از ذرات با مولفه سرعت  $v$  تا  $v + dv$  باشند، توزیع فرکانس متناظر با آن برابر است با:

$$P_f(f) df = P_v(v_f) \frac{dv}{df} df \quad (55-2)$$

که  $v_f = c \left( \frac{f}{f_0} - 1 \right)$  سرعت ذره نسبت به ناظر، متناظر با شیفت دوپلری  $f_0$  به  $f$  است؛ بنابراین:

$$P_f(f) df = \frac{c}{f_0} P_v \left( c \left( \frac{f}{f_0} - 1 \right) \right) df \quad (56-2)$$

در پهن‌شدگی دوپلری گرمایی، توزیع سرعت یک توزیع ماکسولی خواهد بود:

$$P_v(v) dv = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv^2}{2kT}\right) dv \quad (57-2)$$

که در آن  $m$  جرم ذره،  $T$  دما و  $k$  ثابت بولتزمان است، در نتیجه:

$$P_f(f) df = \frac{c}{f_0} \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{m \left[ c \left( \frac{f}{f_0} - 1 \right) \right]^2}{2kT}\right) df \quad (58-2)$$

این رابطه را می‌توان به صورت زیر ساده‌نویسی کرد:

$$P_f(f) df = \sqrt{\frac{mc^2}{2\pi kT f_0^2}} \exp\left(-\frac{mc^2 (f - f_0)^2}{2kT f_0^2}\right) df \quad (59-2)$$

این رابطه بیانگر یک تابع گاوسی<sup>۲۶</sup> می‌باشد که از آن می‌توان به پهنای خط طیفی دست یافت:

$$\Delta f_{\text{FWHM}} = \sqrt{\frac{8kT \ln 2}{mc^2}} f_0 \quad (60-2)$$

<sup>26</sup>Gaussian profile

## ۲-۴-۳ پهن‌شدگی فشاری

وجود ذرات مجاور بر تابش ساطع شده توسط یک ذره منفرد تأثیر می‌گذارد. به طور کلی، برخورد ذرات دیگر با ذره ساطع‌کننده نور، روند انتشار را قطع می‌کند و با کوتاه شدن زمان مشخص این فرآیند، عدم قطعیت در انرژی ساطع شده را افزایش می‌دهد (همانطور که در پهن‌شدگی طبیعی رخ می‌دهد). مدت زمان برخورد بسیار کمتر از طول عمر فرآیند انتشار است. این اثر هم به چگالی و هم به دمای گاز بستگی دارد. اثر پهن‌شدگی فشاری توسط پروفایل لورنتزی توصیف می‌شود و ممکن است همراه با یک جابه‌جایی باشد [۱۲].

## فصل ۳

# روش تصحیح خطوط جوی توسط حل معادلات تابشی

### ۱-۳ جذب ناشی از جو زمین

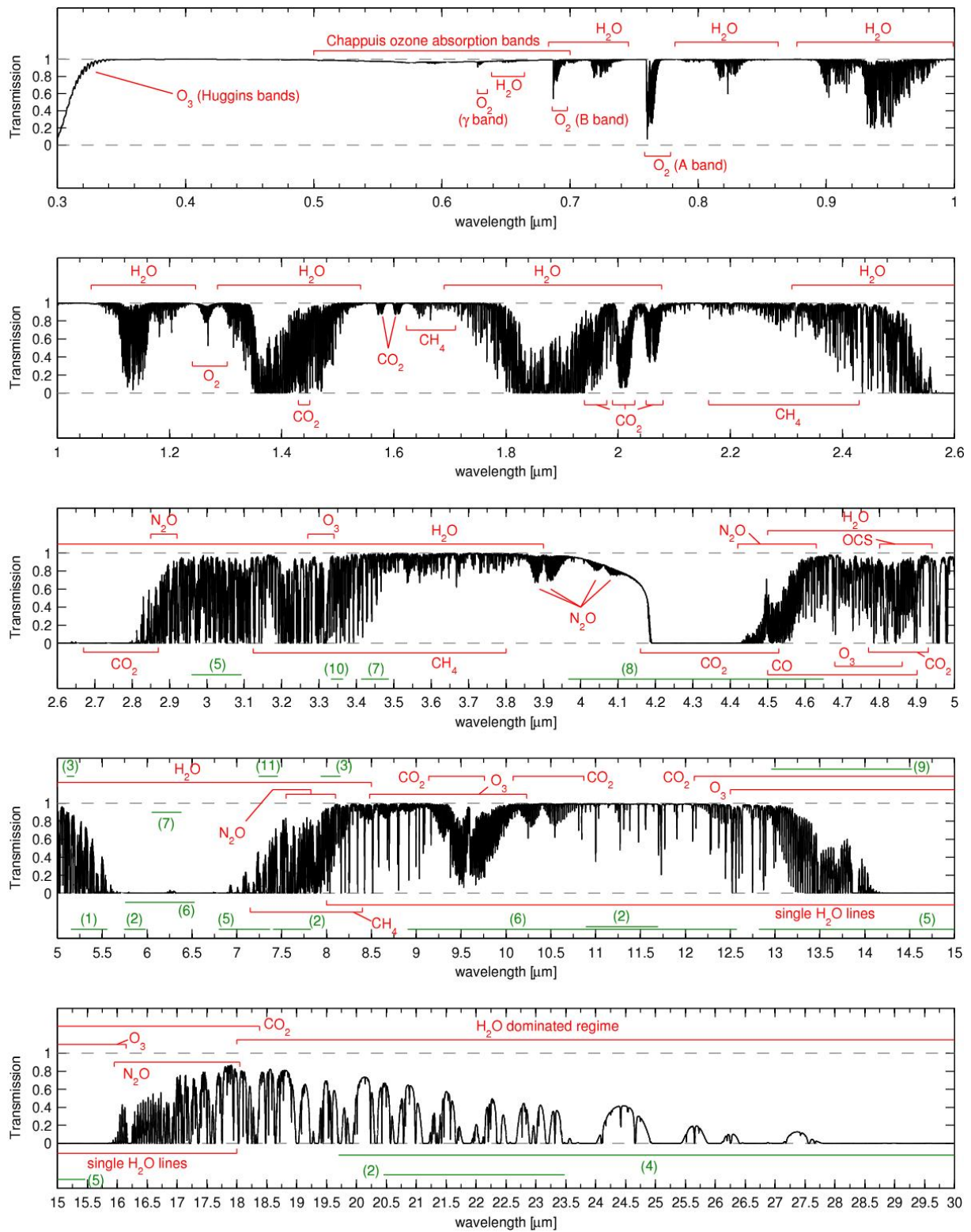
جو زمین از حدود ۷۸%  $N_2$ ، حدود ۲۱%  $O_2$  و حدود ۱%  $Ar$  و چندین گاز کمیاب و هواپخش‌ها<sup>۱</sup> تشکیل شده است. هر یک از مولکول‌ها و هواپخش‌ها با جذب و پراکندگی بر نوری که از طریق رژیم‌های مختلف طول موج عبور می‌کند، تأثیر می‌گذارند. شکل ۱-۳ یک منحنی انتقال مدل‌شده را نشان می‌دهد که از مدل آسمان توسعه یافته در یک پروژه [۲] گرفته شده است. مناطق جذب اصلی از هشت گونه اصلی مولکولی یعنی  $O_2$ ،  $O_3$ ،  $H_2O$ ،  $CO$ ،  $CO_2$ ،  $CH_4$ ،  $OCS$  و  $N_2O$  مشخص شده است.

---

<sup>۱</sup>Aerosol



فصل ۳. روش تصحیح خطوط جوی توسط حل معادلات تابشی ۱-۳. جذب ناشی از جو زمین



شکل ۱-۳: طیف جذب مصنوعی آسمان بین ۰/۳ تا ۳۰ میکرومتر، محاسبه شده با LBLRTM

## HITRAN ۲-۳

پایگاه داده طیف سنجی مولکولی HITRAN<sup>۲</sup> (مخفف انتقال با وضوح بالا) مجموعه‌ای از پارامترهای طیف‌سنجی است که برای شبیه‌سازی و تجزیه و تحلیل انتقال و انتشار نور در محیط‌های گازی، با تاکید بر جو سیاره‌ای استفاده می‌شود. دانش پارامترهای طیف‌سنجی برای گذار بین سطوح انرژی در مولکول‌ها (و اتم‌ها) برای تفسیر و مدل‌سازی برهم‌کنش تابش (نور) با محیط‌های مختلف ضروری است.

برای نیم قرن، HITRAN یک استاندارد بین‌المللی در نظر گرفته شده است که مقدار توصیه شده پارامترها را برای میلیون‌ها گذار برای مولکول‌های مختلف به کاربر ارائه می‌دهد. HITRAN شامل داده‌های تجربی و نظری است که از مقاله‌ها، کتاب‌ها، مقالات، پایگاه‌های داده، پایان‌نامه‌ها، گزارش‌ها، ارائه‌ها، داده‌های منتشر نشده، مقالات در حال آماده‌سازی و ارتباطات خصوصی جمع‌آوری شده است. نسخه اصلی HITRAN توسط آزمایشگاه‌های تحقیقات نیروی هوایی کمبریج (دهه ۱۹۶۰) گردآوری شد و سپس در سال ۱۹۷۳ در دسترس عموم قرار گرفت. HITRAN یک منبع رایگان است و در حال حاضر در مرکز اخترفیزیک هاروارد-اسمیتسونیان، کمبریج MA، ایالات متحده نگهداری و توسعه می‌یابد.

HITRAN مجموعه‌ای از پارامترهای طیف‌سنجی است که کدهای مختلف رایانه‌ای را برای پیش‌بینی و شبیه‌سازی انتقال و انتشار نور در جو استفاده می‌کنند [۱۷].

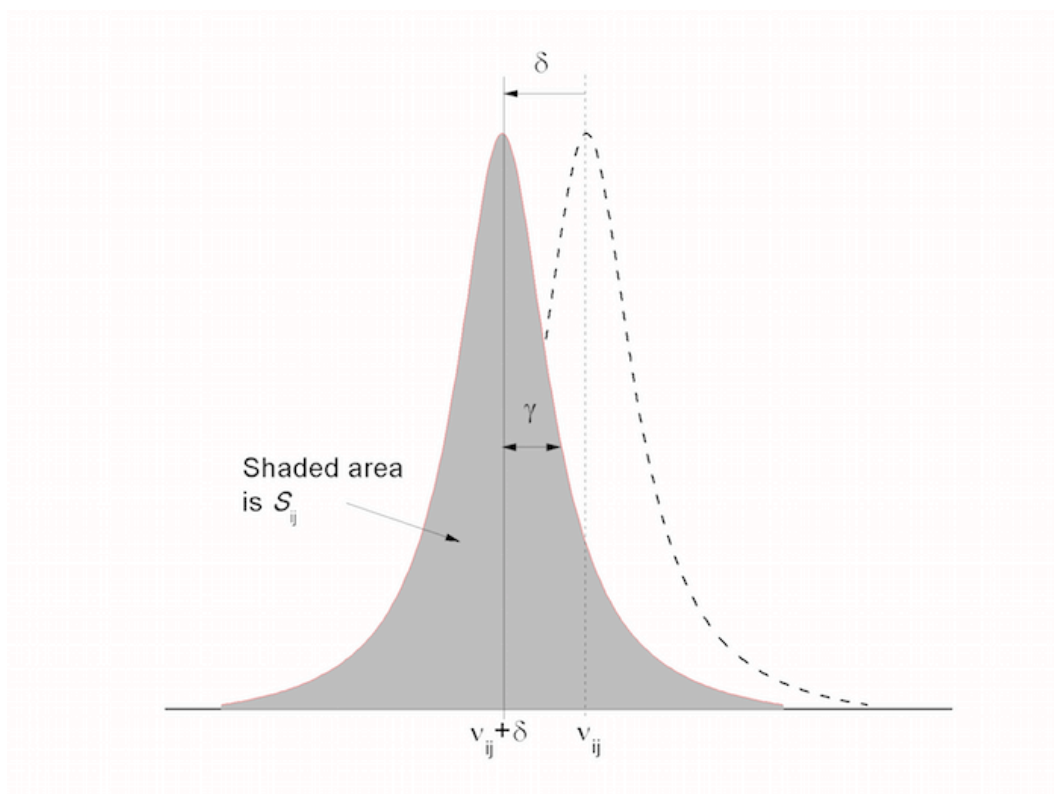
پایگاه داده HITRAN حاوی اطلاعاتی در مورد بیش از ۲/۷ میلیون خط طیفی از ۴۷ گونه مولکولی است.

## HITRAN پارامترهای ۱-۲-۳

در این بخش تعریف، واحدها و کاربرد اساسی پارامترهای خط طیفی HITRAN را توصیف می‌کنیم. ابتدا پارامترهایی که از زمان انتشار ۲۰۰۴ HITRAN در فایل‌های ASCII ارائه شده‌اند، تعریف شده و سپس پارامترهای جدید مورد بحث قرار می‌گیرند.

برخی از این پارامترها به صورت شماتیک در شکل ۲-۳ نشان داده شده‌اند. توجه داشته باشید که واحدهای موجود SI نیستند، اما معمولاً به دلایل تاریخی و همچنین سهولت استفاده به عنوان ورودی اکثر کدهای انتقال تابشی، cgs هستند. در بحث زیر،  $h$  و  $c$  و  $k$  به ترتیب ثابت پلانک، سرعت نور و ثابت بولتزمن و  $c_2 = hc/k$  ثابت دوم تابش هستند.

<sup>۲</sup>High-resolution TRANsmission



شکل ۲-۳: شماتیک پارامترهای اساسی یک خط طیفی در HITRAN. پروفایل لورنتزی در این شکل فرض شده است.

● Mol : شماره شناسایی گونه‌های مولکولی (ID)

در حال حاضر، HITRAN از ۱ Mol = (برای  $H_2O$ ) تا ۴۷ (برای  $SO_3$ ) استفاده می‌کند. Mol معنی ذاتی ندارد. به یک مولکول به ترتیب معرفی آن در HITRAN، یک عدد متوالی اختصاص داده می‌شود.

● Iso : شماره شناسنامه ایزوتوپولوگ<sup>۳</sup>

1 = Iso برای فراوان‌ترین ایزوتوپولوگ (با توجه به مقدار زمینی)، برای فراوان‌ترین بعدی 2 = Iso و به همین ترتیب تا آخر. ایزوتوپولوگ، دو قلو مولکولی است، همانطور که گفته می‌شود و تنها از نظر ترکیب ایزوتوپی با مولکول اصلی متفاوت است (تعداد تعویض‌های ایزوتوپی). به عنوان مثال،  $^{12}CH_4$  و  $^{13}CH_4$  ایزوتوپولوگ  $^{12}CH_4$  هستند.

<sup>3</sup>Isotopologue

- $\nu_{ij}$  : عدد موج<sup>۴</sup> خط طیفی ( $cm^{-1}$ ) در خلا  
انتقال بین حالت‌های پایین و بالا  $i$  و  $j$  با انتشار یا جذب فوتونی با انرژی  $\Delta E = E_i - E_j = \nu_{ij}$  همراه است. در جاهای دیگر به ترتیب از (” و ’) برای حالت‌های پایین و بالا استفاده می‌شود.

- $S_{ij}$  : شدت خط طیفی ( $cm^{-1} / (molecule \cdot cm^{-2})$ ) در  $T_{ref} = 296K$   
شدت در اینجا برای یک مولکول واحد، در واحد حجم تعریف شده است. می‌توان آن را به صورت یک منطقه سایه‌دار در زیر خط در شکل ۲-۳ مشاهده کرد و از رابطه زیر بدست آورد:

$$S_{ij} = I_a \frac{A_{ij} g' e^{-c_2 E''/T} (1 - e^{-c_2 \nu_{ij}/T})}{8\pi c \nu_{ij}^2 Q(T)} \quad (1-3)$$

باید دوباره تأکید کرد که  $S_{ij}$  با توجه به فراوانی ایزوتوپی زمینی  $I_a$  وزن می‌شود، که اطلاعات مربوط به آن‌ها در آدرس زیر آورده شده است؛ همچنین مجموع تابع پارتیشن داخلی  $Q(T)$  توسط رابطه زیر داده می‌شود

$$Q(T) = \sum_k g_k \exp\left(-\frac{c_2 E_k}{T}\right) \quad (2-3)$$

که مقادیر آن‌ها نیز برای دماهای مختلف در HITRAN موجود می‌باشد.

<https://hitran.org/docs/iso-meta/>

- $A_{ij}$  : ضریب انیشتین-A در یک گذار  
 $A_{ij}$  این مزیت را دارد که مستقل از دما و فراوانی ایزوتوپولوگ است.
- $\gamma_{air}$  : نیم پهنا در نصف بیشینه (HWHM) هوا گسترده شده ( $cm^{-1}/(atm)$ ) در  $T_{ref} = 296K$   
و فشار مرجع  $P_{ref} = 1atm$
- $\gamma_{self}$  : نیم پهنا در نصف بیشینه (HWHM) خود گسترده شده ( $cm^{-1}/(atm)$ ) در  $T_{ref} = 296K$   
و فشار مرجع  $P_{ref} = 1atm$

<sup>4</sup>Wavenumber

- $E''$ : انرژی حالت پایین‌تر در گذار ( $cm^{-1}$ )
  - $n_{air}$ : ضریب وابستگی به دمای، نیم پهنای هوا گسترده شده
  - $\delta_{air}$ : شیفت موقعیت خط ( $cm^{-1}/(atm)$ ) در  $T_{ref} = 296K$  و  $P_{ref} = 1atm$  با توجه به عدد موج در خلا  $\nu_{ij}$
- توجه داشته باشید که شیفت‌ها بسته به نوع گذار می‌توانند منفی یا مثبت باشند. در شکل ۳-۲، تغییر نشان داده شده منفی است، که بیشتر رایج است.
- $g', g''$ : وزن آماری حالت پایین و بالا
- وزن شامل آمار الکترونیکی، ارتعاشی، چرخشی و هسته‌ای است. هنگام محاسبه وزن برای حالات تبهگن باید احتیاط کرد.

### ۲-۲-۳ کاربرد پارامترها

- وابستگی شدت خط به دما
- برای محاسبه شدت در دمای متفاوت از دمای مرجع، HITRAN از عبارت زیر استفاده می‌کند
- $$S_{ij}(T) = S_{ij}(T_{ref}) \frac{Q(T_{ref}) \exp(-c_2 E''/T) [1 - \exp(-c_2 \nu_{ij}/T)]}{Q(T) \exp(-c_2 E''/T_{ref}) [1 - \exp(-c_2 \nu_{ij}/T_{ref})]} \quad (3-3)$$
- عامل سوم در سمت راست در معادله‌ی بالا، نسبت جمعیت‌های بولتزمن و عامل چهارم تأثیر انتشار تحریک شده را محاسبه می‌کند.
- وابستگی پهنای خط به دما و فشار
- وقتی شخصی با پایگاه داده کار می‌کند، معمولاً شکل خط، Voigt فرض می‌شود، که یک کانولوشن<sup>۵</sup> از تابع توزیع گاوسی<sup>۶</sup> (پهن شدگی دوپلری) و تابع توزیع لورنتزی<sup>۷</sup> (پهن شدگی فشاری) است:

<sup>5</sup>Convolution

<sup>6</sup>Gaussian

<sup>7</sup>Lorentzian

$$V(\nu; \nu_{ij}, T, p) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} f_G(\nu; \nu_{ij}, T) f_L(\nu; \nu_{ij}, T, p) d\nu \quad (4-3)$$

نیم پهنا در نصف بیشینه (HWHM) برای پهن شدگی دوپلری توسط این رابطه بدست می‌آید

$$\alpha_D(T) = \frac{\nu_{ij}}{c} \sqrt{\frac{2N_A kT \ln 2}{M}} \quad (5-3)$$

جایی که  $M$  جرم مولی ایزوتوپولوگ بر حسب گرم و  $N_A$  ثابت آووگادرو<sup>۸</sup> است.

نیم پهنا در نصف بیشینه (HWHM) برای تابع توزیع لورنتزی (پهن شدگی فشاری) برای گازی در فشار  $p$  (اتمسفر)، دمای  $T$  (کلوین) و فشار جزئی  $P_{\text{ref}}$  (اتمسفر) به صورت زیر مدل می‌گردد:

$$\gamma(p, T) = \left(\frac{T_{\text{ref}}}{T}\right)^{n_{\text{air}}} (\gamma_{\text{air}}(p_{\text{ref}}, T_{\text{ref}})(p - p_{\text{self}}) + \gamma_{\text{self}}(p_{\text{ref}}, T_{\text{ref}})p_{\text{self}}) \quad (6-3)$$

• ضریب جذب

در جو، یک خط طیفی در اطراف عدد موج انتقال  $\nu_{ij}$  گسترده می‌شود، گسترش توسط تابع بهنجار شده‌ی خط،  $f(\nu; \nu_{ij}, T, p)$  نشان داده می‌شود.

در جو پایین، گسترش فشاری بر شکل خطوط طیفی، غالب است و تابع لورنتزی به صورت زیر اعمال می‌گردد:

$$f_L(\nu; \nu_{ij}, T, p) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma(p, T)}{\gamma(p, T)^2 + [\nu - (\nu_{ij} + \delta(p_{\text{ref}})p)]^2} \quad (7-3)$$

در محیط کم فشار در جو فوقانی، گسترش دوپلری بر شکل خطوط طیفی، غالب است و تابع گاوسی به صورت زیر اعمال می‌گردد:

$$f_G(\nu; \nu_{ij}, T) = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi \alpha_D^2}} \exp\left(-\frac{(\nu - \nu_{ij})^2 \ln 2}{\alpha_D^2}\right) \quad (8-3)$$

<sup>8</sup>Avogadro constant

سرانجام، ضریب جذب تک رنگ ( $1/(\text{molecule cm}^{-2})$ )  $\alpha_{ij}(\nu, T, p)$  در عدد موج ( $\text{cm}^{-1}$ )  $\nu$  ناشی از گذار، توسط رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\alpha_{ij}(\nu, T, p) = S_{ij}(T) f(\nu; \nu_{ij}, T, p) \quad (۹-۳)$$

## ۳-۳ جو زمین

## ۳-۳-۱ بخش بندی بر پایه‌ی دما

## • تروپوسفر

تروپوسفر<sup>۹</sup> پایین‌ترین لایه‌ی جو و نزدیک‌ترین لایه به سطح زمین است و از سطح زمین آغاز شده و تا ارتفاع ۱۸-۱۰ کیلومتری (۱۱-۶ مایلی) ادامه می‌یابد. بسیاری از ابرها و سیستم‌های آب‌وهوایی در این لایه قرار دارند. ضخامت تروپوسفر در قطب حدود ۸-۷ کیلومتر (۵ مایل) و در استوا حدود ۱۸-۱۶ کیلومتر (۱۱-۱۰ مایل) است. علاوه بر این، ارتفاع این لایه به تغییر فصل‌ها نیز بستگی دارد. ۸۰ درصد کل جرم جو و ۹۹ درصد بخار آب جو در تروپوسفر قرار دارد. بخار آب موجود در تروپوسفر در مناطق گرم و به ویژه مناطق استوایی زیاد و در مناطق قطبی کم است. بخار آب با جذب انرژی تابشی گرمایی خورشید نقش مهمی در تنظیم آب‌وهوای زمین دارد.

با افزایش ارتفاع در تروپوسفر، چگالی گازها کاهش می‌یابد و هوا رقیق‌تر می‌شود؛ بنابراین، دمای هوا با افزایش ارتفاع در این لایه نیز کاهش می‌یابد. هم‌چنین با افزایش ارتفاع، فشار هوا نیز کاهش می‌یابد. دمای هوا در سطح زمین ۱۵ درجه‌ی سانتی‌گراد و در ارتفاع ۱۰ کیلومتر ۴۹/۹- درجه‌ی سانتی‌گراد است. فشار در سطح زمین ۱۰۱۳۲/۰ بار و در ارتفاع ۱۰ کیلومتر ۲۶۵/۰ بار است. با افزایش ارتفاع، چگالی کاهش می‌یابد و در نتیجه تروپوسفر چگال‌ترین لایه‌ی جو است. ابرهایی مانند کومولوس و استراتوس در این لایه قرار دارند. هم‌چنین هواپیماها عمدتاً در این لایه پرواز می‌کنند.

## • استراتوسفر

استراتوسفر<sup>۱۰</sup> دومین لایه‌ی جو زمین است که از ارتفاع ۱۰ کیلومتری (۶/۲ مایلی) آغاز شده و تا ارتفاع ۵۰ کیلومتری (۳۱ مایلی) ادامه می‌یابد. ارتفاع استراتوسفر به طول و عرض جغرافیایی و تغییر فصل‌ها بستگی دارد.

استراتوسفر از ارتفاع ۱۶ کیلومتری (۱۰ مایلی) بر فراز استوا و از ارتفاع ۱۰ کیلومتری (۶ مایلی) بر فراز قطب آغاز می‌گردد. بخار آب بسیار کمی در استراتوسفر وجود دارد و دلیلش این است که تقریباً

<sup>۹</sup>Troposphere<sup>۱۰</sup>Stratosphere



همه ابرها به استثنای ابرهای استراتوسفری قطبی در تروپوسفر قرار دارند. این ابرها در ارتفاع ۱۵-۲۵ کیلومتری (۹/۳-۱۵/۵ مایلی) یافت می‌شوند. هوا در این لایه تقریباً هزار برابر نازکتر از هوا در سطح دریا است (تراکم مولکول‌ها در سطح دریا تقریباً هزار برابر تراکم مولکول‌ها در استراتوسفر است). در این لایه با افزایش ارتفاع، دما نیز افزایش می‌یابد و دلیل آن وجود غلظت بالایی از مولکول‌های ازون است. دما در ارتفاع ۵۰ کیلومتری به حدود ۶- درجه سانتی‌گراد می‌رسد. پرتوی فرابنفش تولید شده توسط تابش خورشید در صورت رسیدن به سطح زمین می‌تواند موجب سرطان پوست، آب‌مروارید چشم، آسیب رساندن به سیستم ایمنی بدن و تأثیر منفی بر رشد گیاهان شود. مولکول‌های ازون و اکسیژن که در استراتوسفر قرار دارند، پرتوهای فرابنفش خورشید را جذب می‌کنند و مانند یک سپر مانع از ورود این پرتوها به سطح زمین می‌شوند. ازون و اکسیژن می‌تواند ۹۵-۹۹/۹٪ پرتوهای فرابنفش به ویژه فرابنفش نوع C و B که پارانرژی‌ترین پرتوهای فرابنفش هستند و موجب آسیب زیستی می‌شوند را جذب کند.

#### ● مزوسفر

مزوسفر<sup>۱۱</sup> لایه‌ی بعدی زمین است که میان استراتوسفر و ترموسفر قرار دارد. این لایه از ارتفاع ۵۰ کیلومتری (۳۱ مایلی) آغاز شده و تا ارتفاع ۸۵ کیلومتری (۵۳ مایلی) ادامه می‌یابد. با افزایش ارتفاع در مزوسفر، دما کاهش می‌یابد. سردترین بخش جو زمین با دمای ۹۰- درجه سانتی‌گراد در بالای این لایه قرار دارد. فشار هوا در بخش‌های بالایی مزوسفر یک میلیونیم فشار هوا در سطح دریا است. روزانه حدود ۵۰ تن شهاب‌سنگ وارد جو زمین می‌شود و بیشتر آن‌ها در لایه مزوسفر تبخیر می‌شوند. این‌گونه مواد موجود در شهاب‌سنگ‌ها در مزوسفر پراکنده می‌شوند و این لایه هم‌اکنون دارای مقادیر آهن و فلزات دیگر است. بالون‌های هواشناسی و هواپیما نمی‌توانند به این لایه برسند. ابرهای شب‌تاب از دیگر ابرها بسیار بالاتر هستند و بالای مزوسفر قرار دارند. جزر و مد جو نیز تحت تأثیر این لایه است و هوا در این لایه بسیار رقیق است.

#### ● ترموسفر

ترموسفر<sup>۱۲</sup> بالاترین لایه‌ی جو زمین است که میان مزوسفر و آگزوسفر قرار دارد. این لایه از ارتفاع ۹۰ کیلومتری (۵۶ مایلی) آغاز شده و تا ارتفاع ۵۰۰ کیلومتری (۳۱۱ مایلی) یا ۱,۰۰۰ کیلومتری

<sup>11</sup> Mesosphere

<sup>12</sup> Thermosphere

(۶۲۱ مایلی) ادامه می‌یابد. با افزایش ارتفاع در ترموسفر، دما در بخش‌های پایینی این لایه به شدت افزایش می‌یابد اما در بخش‌های بالایی دما نسبتاً ثابت می‌ماند. فعالیت‌های خورشیدی دما در این لایه را به شدت تحت تأثیر قرار می‌دهد. دمای ترموسفر معمولاً در طول روز ۲۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد بیشتر از شب است و زمان‌هایی که خورشید بسیار فعال است، دما در این لایه از ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد به ۲,۰۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد افزایش می‌یابد.

چگالی در ترموسفر بسیار کم است و برخی بر این باورند که فضای بیرونی از بخش‌های پایینی ترموسفر آغاز می‌گردد، اما این لایه بخشی از جو زمین به‌شمار می‌آید. شاتل‌های فضایی و ایستگاه‌های فضایی بین‌المللی در این لایه قرار دارند. در بخش‌های پایینی این لایه اکسیژن اتمی ( $O$ )، نیتروژن اتمی ( $N$ ) و هلیم ( $He$ ) اجزای اصلی هوا هستند. بخش عمده‌ای از پرتو ایکس و فرابنفش در این لایه جذب می‌شوند. یونوسفر<sup>۱۳</sup> زمین متشکل از ذرات یونیزه شده در جو است و با ترموسفر که از نظر الکتریکی خنثی است، هم‌پوشانی دارد. ذرات باردار یونوسفر با اتم‌ها و مولکول‌های ترموسفر برخورد می‌کنند و انرژی اضافی تولید می‌کنند. این انرژی اضافی توسط فوتون‌ها به‌شکل نور ساطع می‌شود و شفق‌های قطبی را رخ می‌دهد. شفق‌های قطبی عمدتاً در ترموسفر رخ می‌دهند.

#### ● اگزوسفر

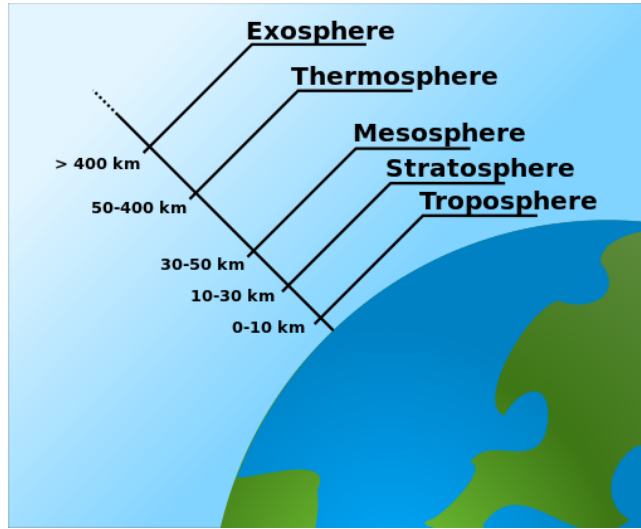
اگزوسفر<sup>۱۴</sup> بالاترین لایه‌ی جو زمین است که جو پس از آن پایان می‌پذیرد و خلأ آغاز می‌گردد. هوا در این لایه بسیار رقیق است و تفاوت چندانی با خلأ ندارد. اجزای اصلی این لایه هیدروژن و هلیم هستند که تراکم کمی دارند و بسیاری از ماهواره‌ها در این لایه قرار دارند.

اگزوسفر مرز میان جو و فضای بیرونی به‌شمار می‌رود و از ارتفاع حدود ۵۰۰ کیلومتر آغاز شده و تا ۱۰,۰۰۰ کیلومتر (۶,۲۰۰ مایل) ادامه می‌یابد. اتم‌ها و مولکول‌های هوا در این لایه به‌طور مداوم به‌فضا می‌گریزند و راه می‌یابند. این لایه شامل حرکات ذرات به درون و بیرون مغناطیس‌سپهر (مگنتوسفر<sup>۱۵</sup>) و باد خورشیدی است. به‌دلیل رقیق بودن بسیار هوا در اگزوسفر، گرمای زیادی در هوا به اشیاء منتقل نمی‌شود، حتی اگر هوا بسیار گرم باشد.

<sup>13</sup>Ionosphere

<sup>14</sup>Exosphere

<sup>15</sup>Magnetosphere



شکل ۳-۳: لایه‌های جو

## ۳-۳-۲ فشار

هر چه ارتفاع افزایش می‌یابد، فشار هوا کاهش می‌یابد؛ زیرا مولکول‌های جو در ارتفاعات بالاتر کاهش یافته و در نتیجه فشار هوا نیز کاهش می‌یابد. از آنجا که بسیاری از مولکول‌های جو توسط گرانش زمین در نزدیکی سطح زمین هستند، ابتدا کاهش فشار هوا به سرعت انجام می‌گیرد (از پایین به بالا) و سپس از سرعت کاهش فشار کاسته می‌شود. از آنجا که بیش از نیمی از مولکول‌های جو در زیر ارتفاع ۵/۵ کیلومتر هستند، ۵۰ درصد فشار هوا در این ارتفاع است.

می‌توان با استفاده از تعادل هیدرواستاتیک و رابطه گاز کامل، رابطه بین فشار و ارتفاع را به صورت زیر مدل نمود:

$$h = \frac{RT}{g} \ln \left[ \frac{P_0}{P} \right] \quad (۳-۱۰)$$

## ۳-۳-۳ پروفایل‌های جوی

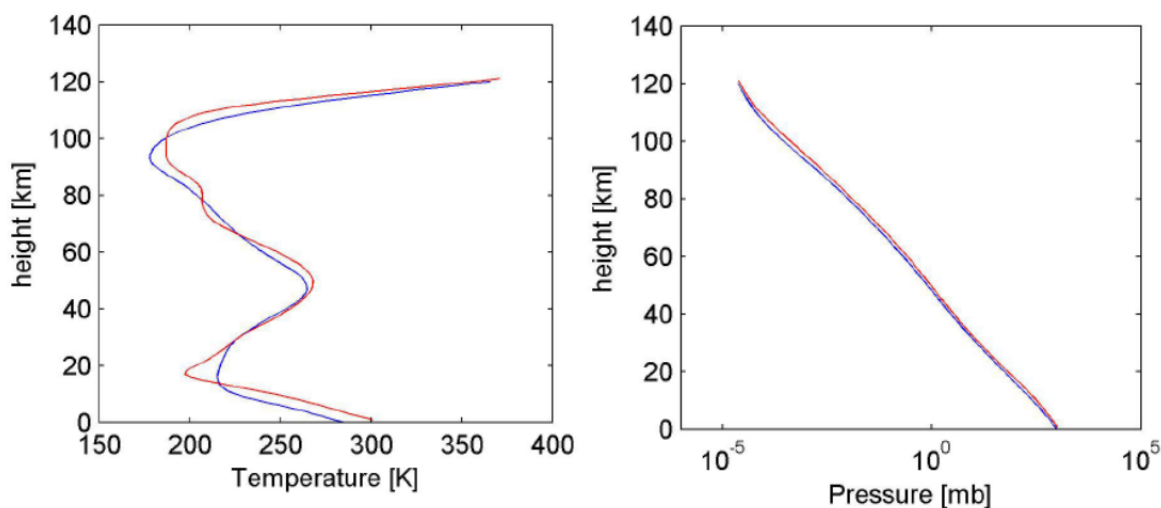
پروفایل‌های جوی معمولاً دما  $T$ ، فشار  $p$  و نسبت مخلوط کردن حجم  $x$  از چندین گونه مولکولی را به عنوان تابعی از ارتفاع  $h$  برای یک مکان مشخص توصیف می‌کند. این پارامترها تأثیر مستقیمی بر شکل و عمق تمام خطوط تلوریک دارند (رابطه‌ی ۲-۴۹ را ملاحظه بفرمایید).

مرجع پروفایل های جوی در Molecfit سایت هواشناسی RFM می باشد که قابل دسترس برای همگان است:

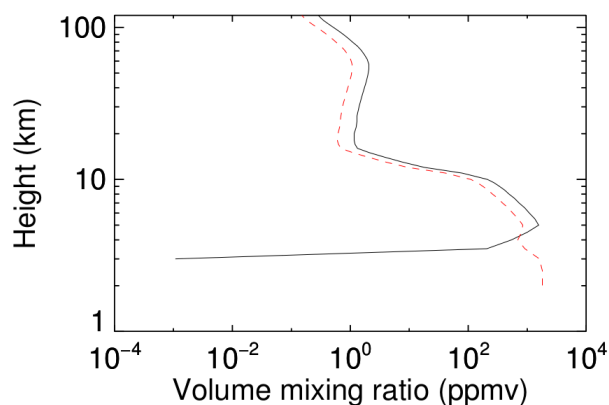
<http://eodg.atm.ox.ac.uk/RFM/atm/>

در این سایت، اطلاعات مربوط به دما، فشار، نسبت مخلوط کردن حجم مولکول های گوناگون در درون جو، هر یک کیلومتر تا ارتفاع ۱۲۰ کیلومتری از سطح آب های آزاد، برای مناطق مختلف جغرافیایی در فصول مختلف سال، موجود می باشد.

<http://eodg.atm.ox.ac.uk/RFM/atm/ngt.atm>



شکل ۳-۴: نمونه هایی از پروفیل های جوی



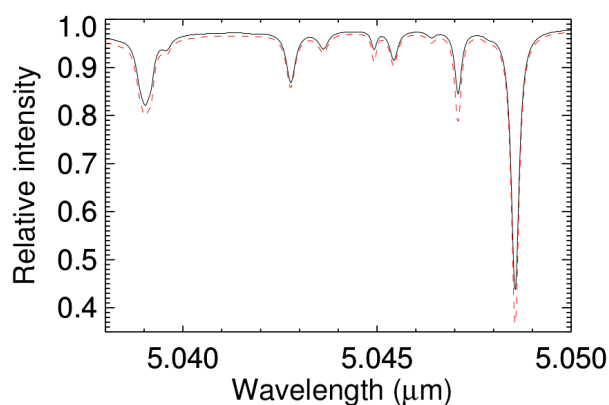
شکل ۳-۵: دو نمونه از توزیع نسبت مخلوط کردن حجم بخار آب به عنوان تابعی از ارتفاع.

## ۳-۴ LBLRTM

مدل انتقال تابشی خط به خط یک مدل دقیق، کارآمد و بسیار انعطاف پذیر برای محاسبه انتقال طیفی و تابش است.

ویژگی‌های LBLRTM<sup>۱۶</sup>، محاسبات درخشندگی طیفی را با دقتی مطابق با اندازه گیری‌هایی که در برابر آن‌ها اعتبار سنجی می‌شوند و زمان‌های محاسباتی را که کاربرد رویکرد خط به خط برای برنامه‌های فعلی انتقال تابشی می‌باشد را بسیار تسهیل بخشیده است [۷].

در حقیقت برنامه‌هایی نظیر LBLRTM، داده‌های هواشناسی، ضرایب جذب مربوط به هر طول موج و موقعیت سماوی هدف را به عنوان ورودی گرفته و با استفاده از روابطی نظیر ۲-۵۰ و ۲-۵۲، طیف جذب مصنوعی را تولید می‌کنند.



شکل ۳-۶: نمونه‌ای از طیف‌های جذب مصنوعی در شرایط متفاوت

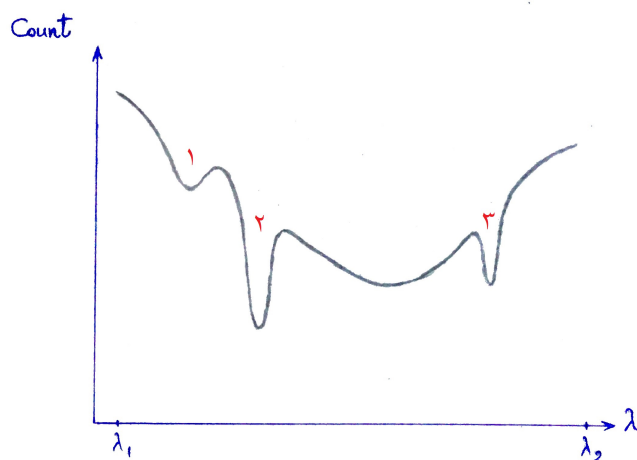
<sup>16</sup>Line-By-Line Radiative Transfer Model

## ۳-۵ روش کار

در این بخش قصد داریم تا به طور خلاصه و شماتیک مراحل کار را شرح دهیم. ابتدا طیف خام ستاره‌ای را مانند شکل ۳-۷ در نظر بگیرید که در درون جو زمین، طیف‌سنجی شده است و بنابراین شامل آثار هم جو و هم ستاره می‌باشد.

همانگونه که در شکل ۳-۷ مشخص است، ۳ خط جذبی در درون این بازه‌ی طول موجی به چشم می‌خورد. فرض کنید:

- ۱- اثر خود ستاره
- ۲- اثر جو زمین
- ۳- اثر خود ستاره + اثر جو زمین



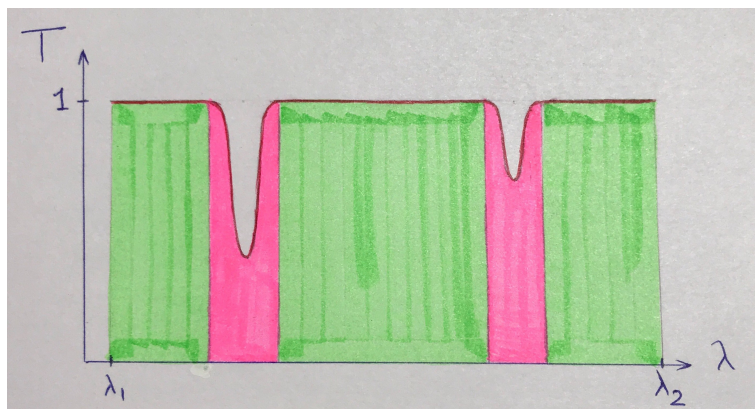
شکل ۳-۷: طیف خام ستاره

count = معیاری از تعداد فوتون‌های دریافتی در هر پیکسل CCD

● مرحله اول: تولید طیف جذب مصنوعی

با توجه به روش‌هایی که در بخش‌های گذشته‌ی همین فصل توضیح داده شد، طیف جذب مصنوعی برای این بازه‌ی طول موج تولید می‌گردد.

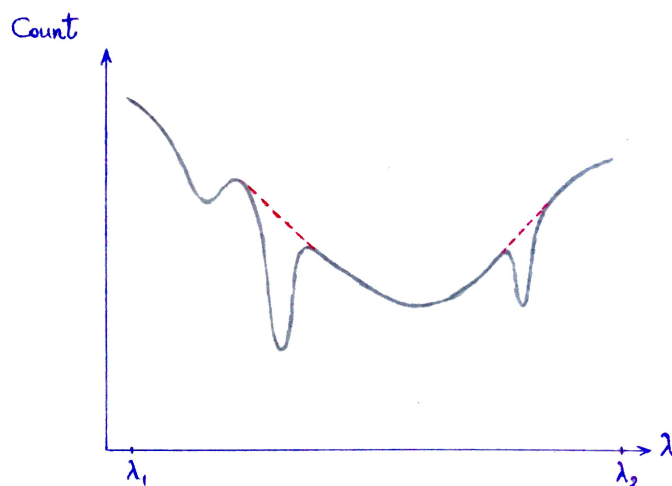
سپس ناحیه‌هایی که آثار جذب مولکول‌های جو زمین در آن‌ها وجود دارد، جدا می‌شوند (رنگ قرمز).



شکل ۳-۸: طیف جذب مصنوعی

● مرحله دوم: تولید زنجیره

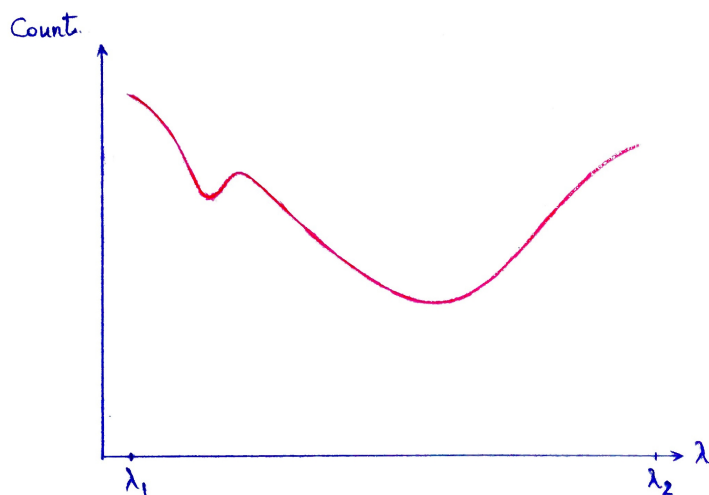
بر روی طیف خام، در مناطق قرمز که آثار جذب جوی وجود دارد، منحنی‌ای با درونیابی، برازش می‌گردد.



شکل ۳-۹: درونیابی در درون مناطق قرمز

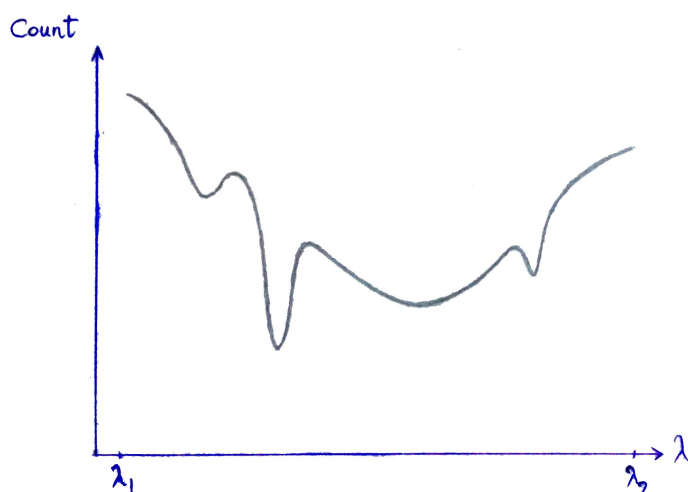
نام این منحنی تولید شده را، زنجیره<sup>۱۷</sup> می‌گذاریم که در شکل ۳-۱۰ قابل مشاهده می‌باشد.

<sup>17</sup>Continuum



شکل ۳-۱۰: منحنی زنجیره

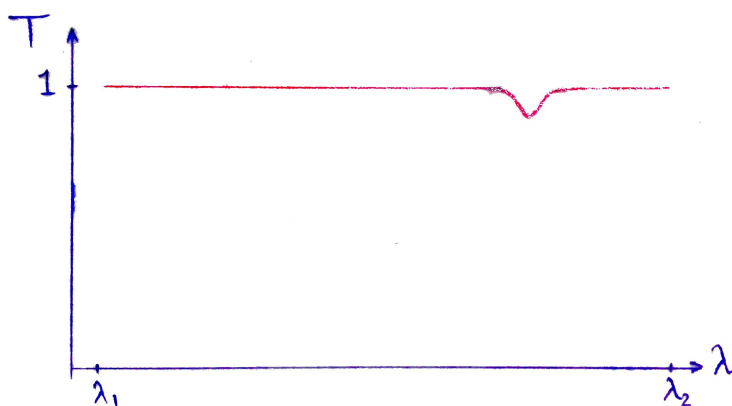
- مرحله سوم: تولید طیف اصلاح شده (به مانند خارج از جو زمین) ابتدا با ضرب مقادیر count منحنی زنجیره، مربوط به هر طول موج (شکل ۳-۱۰) در درصد گذر مربوط به هر طول موج (شکل ۳-۸)، طیفی که در آن آثار جو زمین و خطوطی که تنها شامل آثار خود ستاره (خط سمت راست از شکل ۳-۷) می باشد، مانند شکل زیر، تولید می گردد.



شکل ۳-۱۱: آثار جو زمین + خطوطی که تنها شامل آثار خود ستاره می باشد.

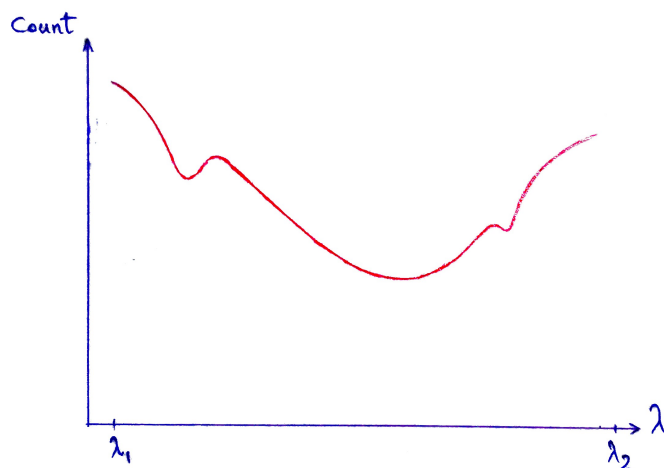


سپس برای مشخص کردن سهم مربوط به ستاره، در خطوطی که شاهد تاثیر هم جو و هم ستاره هستیم (خط سمت چپ از شکل ۳-۷)، مقادیر count طیف خام را بر مقادیر count منحنی شکل ۳-۱۱، در هر طول موج تقسیم می‌کنیم.



شکل ۳-۱۲: سهم مربوط به ستاره، در خطوطی که شاهد تاثیر هم جو و هم ستاره هستیم

در نهایت با ضرب مقادیر به دست آمده در شکل ۳-۱۲ در مقادیر count منحنی زنجیره، مربوط به هر طول موج، طیف اصلاح شده که گویی در بالای جو زمین طیف‌سنجی شده است، تولید خواهد شد.

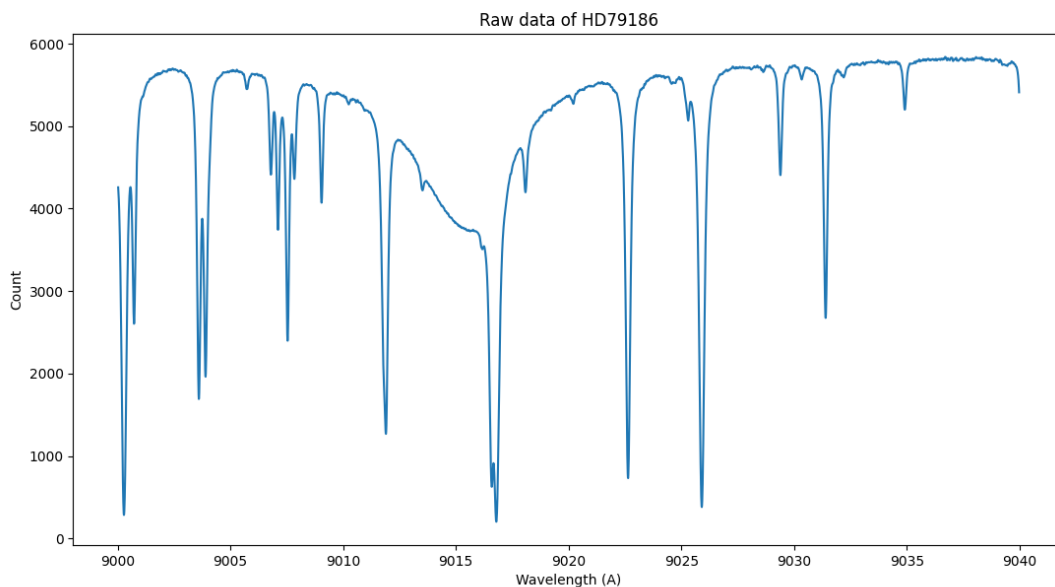


شکل ۳-۱۳: طیف اصلاح شده

## فصل ۴

### نمونه‌ی تمرینی

در این بخش قصد داریم تا مراحل کار را بر روی یک مثال نشان دهیم. مثال ما طیف ستاره متغیر HD۷۹۱۸۶ در نیم کره‌ی جنوبی آسمان است. طیف خام این ستاره در بازه‌ی طول موج ۹۰۰۰ تا ۹۰۴۰ آنگستروم در شکل ۴-۱ قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴-۱: طیف خام ستاره HD۷۹۱۸۶

همچنین اطلاعات مربوط به زمان و شرایط رصد و موقعیت سماوی آن در header فایل fits<sup>۱</sup> آن موجود می‌باشد که در شکل ۴-۲ قابل مشاهده است.

فایل fits: یک فرمت فایل‌های دیجیتالی است که برای ذخیره، انتقال و کنترل تصاویر علمی یا تصاویر دیگر استفاده می‌شود.

```

SIMPLE = T / Written by IDL: Fri Mar 29 09:34:06 2019
BITPIX = -32 / Bits per pixel
NAXIS = 1 / Number of axes
NAXIS1 = 5856 / Axis length
EXTEND = F / File may contain extensions
ORIGIN = 'NOAO-IRAF FITS Image Kernel July 2003' / FITS file originator
IRAF-TLM= '2019-03-22T22:54:31' / Time of last modification
OBJECT = 'HD79186 ' / Name of the object observed
COMMENT FITS (Flexible Image Transport System) format is defined in 'Astronomy
COMMENT and Astrophysics', volume 376, page 359; bibcode: 2001A&A...376..359H
DATE = '2019-03-22T22:54:31' / file creation date (YYYY-MM-DDThh:mm:ss UT)
CTYPE1 = 'LINEAR '
CUNIT1 = 'Angstrom' / Wavelength units
BUNIT = 'ADU '
CRVAL1 = 8899.33105468751
CRPIX1 = 1.
CDELTA1 = 0.025179634126815
LAMRMS = 0.001151 / RMS of wavelength solution [CUNIT1]
LAMNIN = 212 / No. of lines used in wavelength solution
CRDER1 = 7.91E-05 / Wavelength uncertainty [CUNIT1]
CSYER1 = 0.000318 / Typical systematic wavelength error [CUNIT1]
TELESCOP= 'ESO-VLT-U2' / ESO Telescope Name
INSTRUME= 'UVES ' / Instrument used.
RA = 137.768372 / 09:11:04.4 RA (J2000) pointing
DEC = -44.8679 / -44:52:04.4 DEC (J2000) pointing
EQUINOX = 2000. / Standard FK5
RADECSYS= 'FK5 ' / Coordinate reference frame
MJD-OBS = 56977.337456129 / MJD start (2014-11-16T08:05:56.210)
DATE-OBS= '2014-11-16T08:05:56.209' / Date of observation
UTC = 29152. / 08:05:52.000 UTC at start
LST = 25532.081 / 07:05:32.081 LST at start
PI-COI = 'UNKNOWN ' / PI-COI name.
OBSERVER= 'UNKNOWN ' / Name of observer.
ARCFILE = 'UVES.2014-11-16T08:05:56.210.fits' / Archive File Name
DATAMD5 = '8667ff36b46875ab8040079e99d6224c' / MD5 checksum
PIPEFILE= 'red_science_redu.fits' / Filename of data product
EXPTIME = 9.9993 / Total integration time
CD1_1 = 0.025179634126815

```

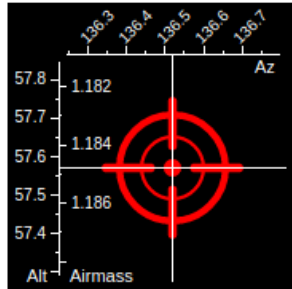
شکل ۴-۲: header فایل fits مربوط به ستاره HD۷۹۱۸۶

<sup>۱</sup>Flexible Image Transport System

## ۴-۱ مرحله اول: تولید طیف جذب مصنوعی

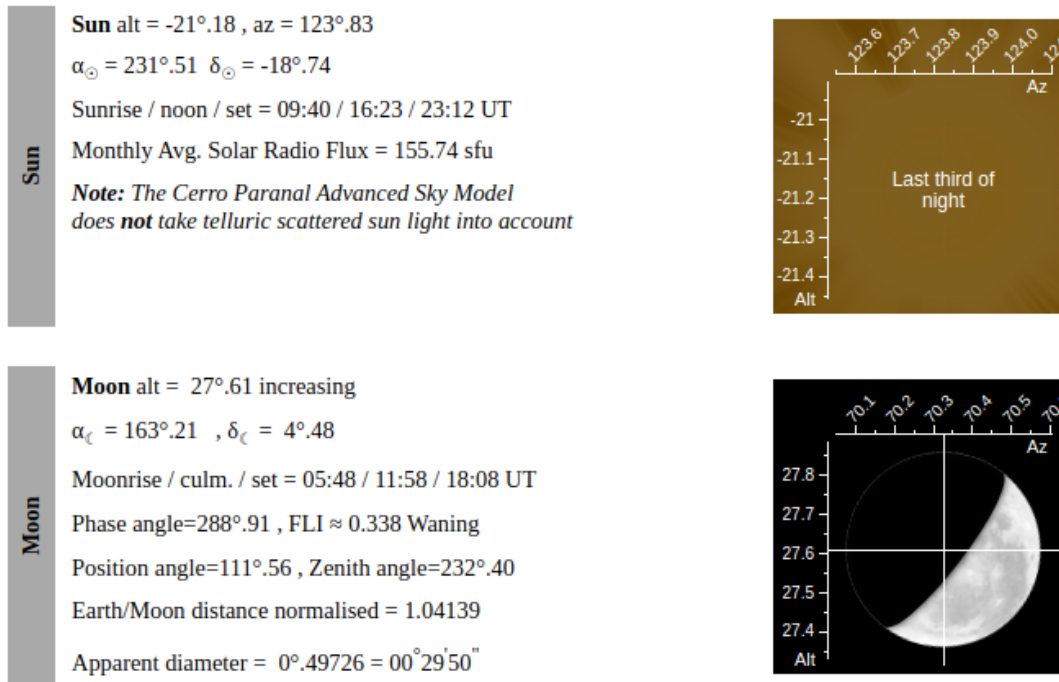
برای تولید طیف جذب مصنوعی، می‌توان با روش گفته شده در بخش ادبیات موضوع، برنامه‌ای نوشت و یا از برنامه‌های Molecfit [۱] و یا SKYCALC [۲] استفاده نمود. با توجه به اینکه این ستاره توسط تلسکوپ VLT<sup>۲</sup> (شکل ۲-۱۱) واقع در کشور شیلی، طیف‌سنجی شده است و اطلاعات آب و هوایی آن در برنامه‌ی آنلاین SKYCALC موجود می‌باشد، از این برنامه برای تولید طیف جذب مصنوعی استفاده خواهیم نمود [۱۸].

Site	Observatory	2640m (VLT Cerro Paranal) ▼	
	Paranal -24°.6274, -70°.4039 (-24°37:38, -70°24:14) Apparent horizon altitude = -1°.95		
Time	<input checked="" type="radio"/> UT	16/11/2014 08:05:52	Time step forward/back 1 hour ▼ + -
	<input type="radio"/> MJD	56977.33740741	
Paranal Local Civil Time LCT = 05:05:52		Last third of night	
Paranal Local Sidereal Time LST = 07:05:33			
Target	Target coordinates from CDS Simbad searching by		
	Name or ID:	Aldebaran / HIP20109 / M33 ... search	
	$\alpha$	137.768372 °	$\delta$ -44.8679 ° toggle units
	Barycentric velocity correction $dv = -15.766$ km/s, $dz = -5.259e-5$		
	Hour Angle HA = 21:54:29		
	Target az = 136°.52 alt = 57°.57		
	Zenith distance = 32°.43		
	Airmass = 1.185		
	Ecliptic heliocentric coords = -73°.16, -56°.80		
	Galactic coords = 267°.34, 2°.25		
Moon/target separation = 54°.34			



شکل ۴-۳: محیط برنامه‌ی آنلاین SKYCALC

<sup>۲</sup>Very Large Telescope

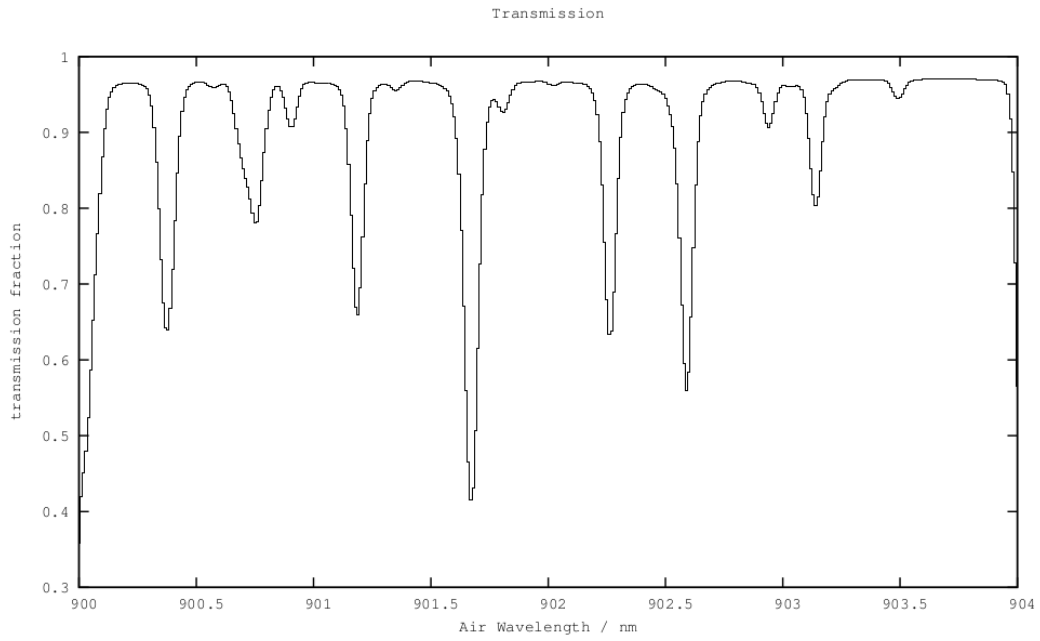


شکل ۴-۴: محیط برنامه‌ی آنلاین SKYCALC

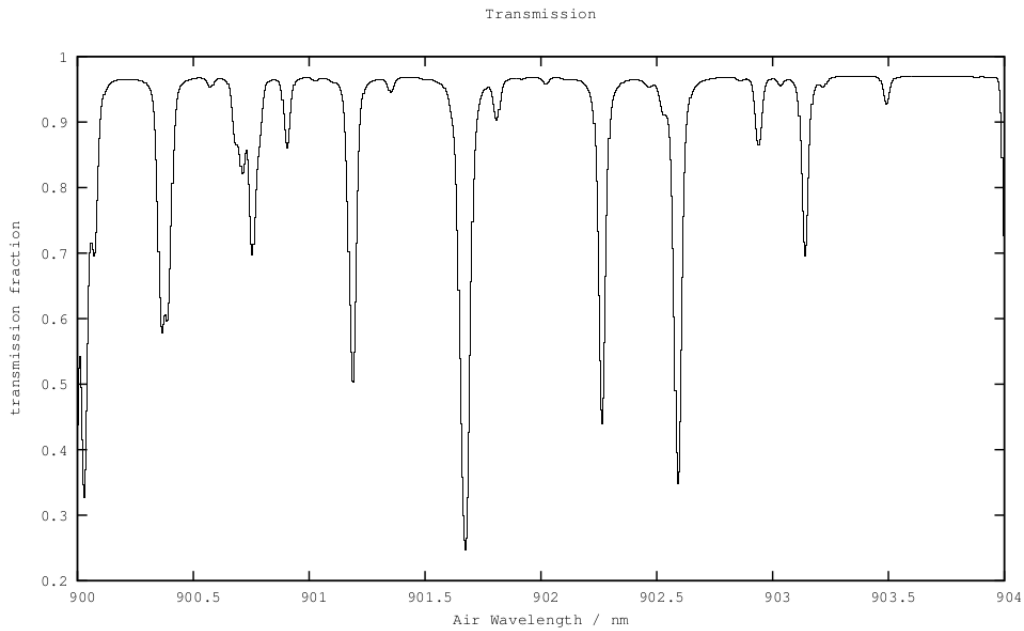
با وارد کردن اطلاعات مربوط به رصد ستاره HD۷۹۱۸۶ در محیط برنامه‌ی SKYCALC ، می‌توان خروجی‌های گوناگونی از آن گرفت که ما از فایل <sup>۳</sup> ascii برای کارمان استفاده خواهیم نمود.   
 ascii : جداول ASCII یکی از اصلی‌ترین قالب‌های تبادل داده است که در علم مورد استفاده قرار می‌گیرد.   
 طیف جذب مصنوعی، مربوط به موقعیت مکانی و زمانی و مختصات سماوی ستاره‌ی مذکور، با سه وضوح متفاوت، در شکل‌های ۴-۵ ، ۴-۶ و ۴-۷ قابل مشاهده می‌باشد.

توجه: برای ایجاد طیف اصلاح شده‌ی بهتر، لازم است که حتماً از بیشترین وضوح ممکن استفاده شود (دلیل آن در انتهای همین فصل مورد بحث و بررسی قرار گرفته است) و همچنین بازه‌ی طول موج انتخابی، بایستی در داخل بازه‌ی طول موج طیف خام ستاره، انتخاب گردد!

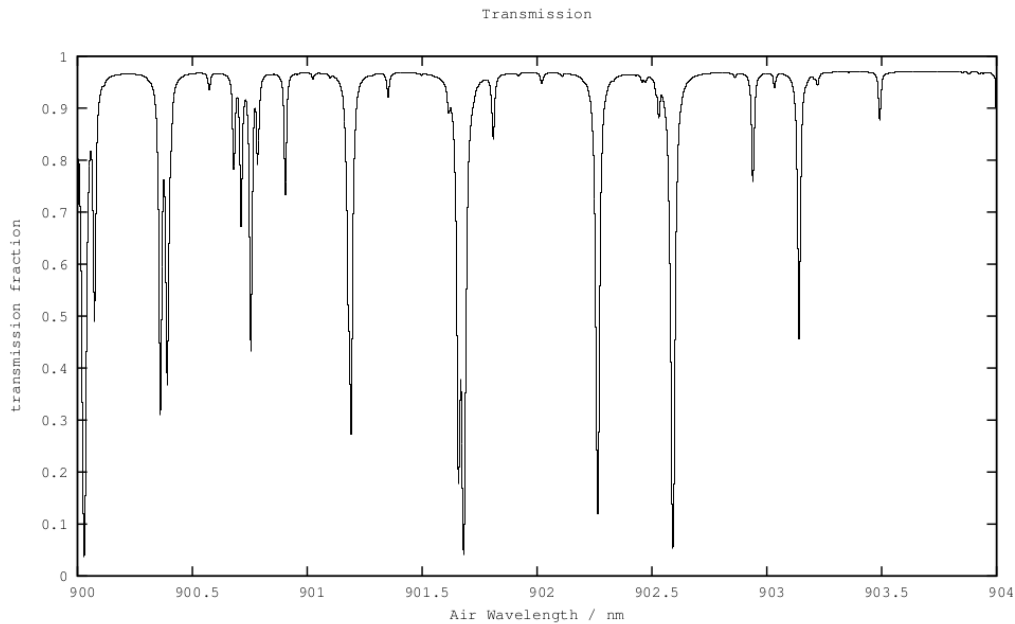
<sup>3</sup>American Standard Code for Information Interchange



شکل ۴-۵: طیف جذب مصنوعی با وضوح ۴۰۰ شبکه



شکل ۴-۶: طیف جذب مصنوعی با وضوح ۸۰۰ شبکه



شکل ۴-۷: طیف جذب مصنوعی با وضوح ۴۰۰۰ شبکه

برای شروع برنامه با توجه به اینکه در python<sup>۳</sup> نوشته می‌شود، ابتدا کتابخانه‌های مورد نیاز را فراخوانی میکنیم (شکل ۴-۸).

```
# Import some libraries that we need

import pandas as pd
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.interpolate import interp1d
```

شکل ۴-۸: کتابخانه‌های مورد نیاز

سپس داده‌های طیف خام و طیف جذب مصنوعی را به شکل فایل ascii وارد برنامه میکنیم (شکل ۴-۹).

```
# Import Raw data & Synthetic data

Raw_data = 'Raw.ascii'

Synthetic_data = 'Synthetic.ascii'
```

شکل ۴-۹: ورود داده‌های طیف خام و طیف جذب مصنوعی

در ادامه، داده‌ها را خوانده و تبدیل به آرایه می‌کنیم (شکل ۴-۱۰).

```
# Read & convert comma-separated values (csv) files into arrays
```

```
df = pd.read_csv(Raw_data, header = None, sep = r'\s+')
dF = pd.read_csv(Synthetic_data, header = None, sep = r'\s+')

x,y = np.array(df[0]),np.array(df[1])
X,Y = np.array(dF[0]),np.array(dF[1])
```

شکل ۴-۱۰: خواندن و تبدیل داده‌ها به آرایه

حال برای مقایسه و محاسبات بعدی نیاز هست تا ابتدا واحدهای طول موج یکسان گردد (آنگستروم) و سپس طول موج‌ها برای هر دو طیف خام و جذب مصنوعی، دقیقاً مشابه یکدیگر گردند، که این کار با درونیابی انجام می‌شود (شکل ۴-۱۱).

```
# Co-scaling the wavelength unit (Angstrom) of Raw data and Synthetic data
```

```
X, Y = (10*X), Y
```

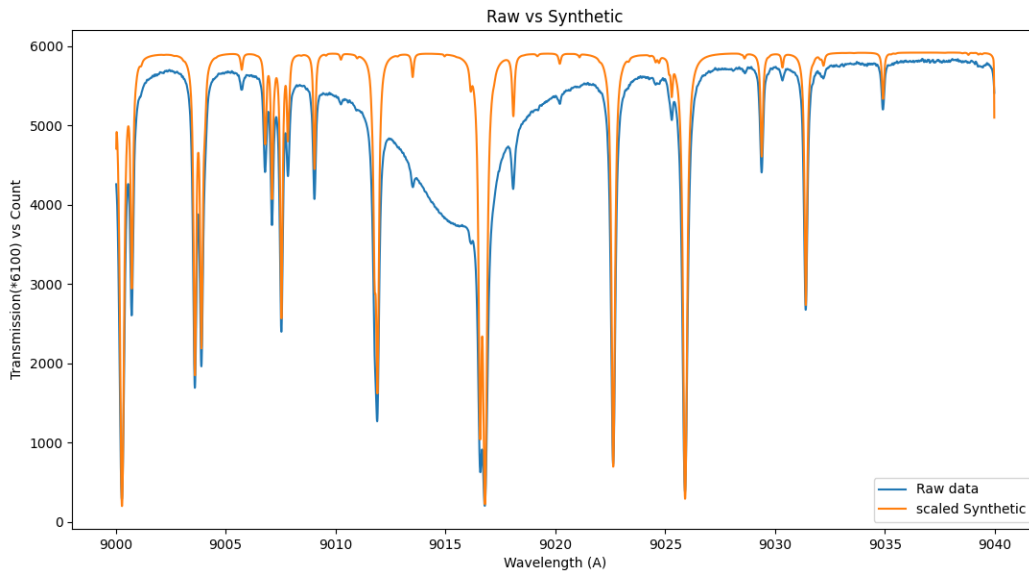
```
# Interpolation in Raw data for generating data in identical wavelengths with Synthetic data,
# to obtain comparison ability
```

```
f1 = interp1d(x, y, kind='cubic')
y = f1(X)
x = X
```

شکل ۴-۱۱: یکسان‌سازی واحدهای طول موج و مشابه‌سازی آن‌ها

همچنین همانگونه که در شکل ۴-۱۲ مشخص است، تمام خطوط تلوریک مربوط به طیف خام ستاره و طیف جذب مصنوعی، منطبق بر یکدیگر می‌باشند.





شکل ۴-۱۲: مقایسه خطوط تلوریک

## ۴-۲ مرحله دوم: تولید زنجیره

حال آرایه‌ها را تبدیل به لیست کرده و خطوط تلوریک را از طیف خام حذف می‌کنیم. برای این کار، با توجه به شکل ۴-۷، تمام نقاطی که کسر انتقال آن‌ها کمتر از  $0.954$  می‌باشد را کنار می‌گذاریم (شکل ۴-۱۳).

```
# Convert arrays to lists
```

```
XX = X.tolist()
YY = Y.tolist()
xx = x.tolist()
yy = y.tolist()
```

```
# Eliminate absorption regions for generating Continuum
```

```
x_continuum = []
y_continuum = []
n = 0
for i in YY:
    if i >= 0.954:
        x_continuum.append(xx[n])
        y_continuum.append(yy[n])
        n = n + 1
    else:
        n = n + 1
```

شکل ۴-۱۳: تبدیل آرایه‌ها به لیست و حذف خطوط تلوریک از طیف خام

برای درونیابی در مناطق حذف شده، ابتدا لازم است تا مناطق دو سر طیف خام که خطوط جذبی قرار دارند و در درونیابی بی‌اثر می‌باشند، کنار گذاشته شوند.

سپس با درونیابی به وسیله یک تابع چندجمله‌ای (در این برنامه چندجمله‌ای درجه ۳ مورد استفاده قرار می‌گیرد)، منحنی زنجیره تولید می‌گردد (شکل ۴-۱۴، ۴-۱۵ و ۴-۱۶).

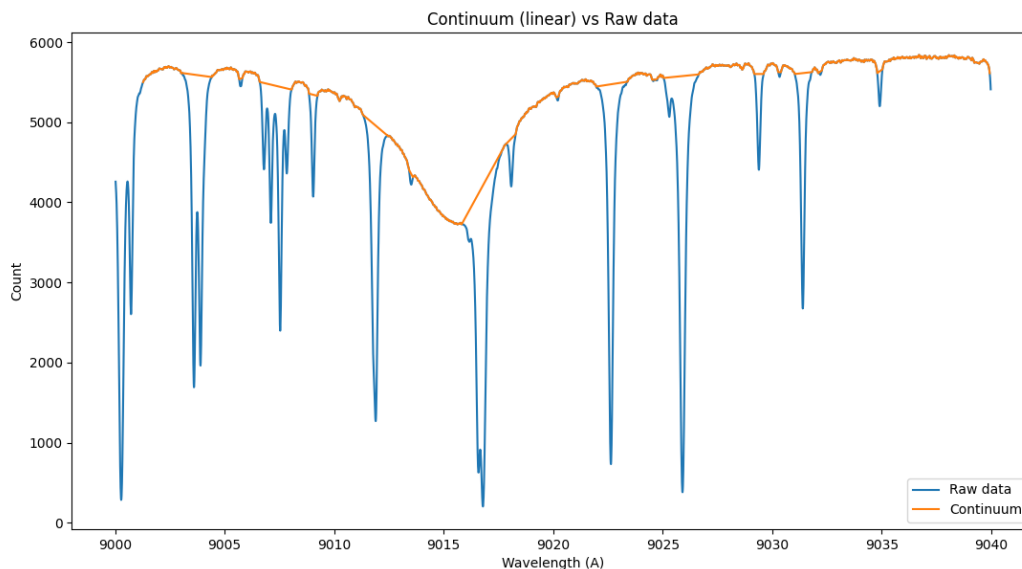
```
# Eliminate Raw data useless regions at the end of both sides
```

```
xC0 = []
m = 0
for i in xx:
    if min(x_continuum) < i < max(x_continuum):
        xC0.append(xx[m])
        m = m + 1
    else:
        m = m + 1
```

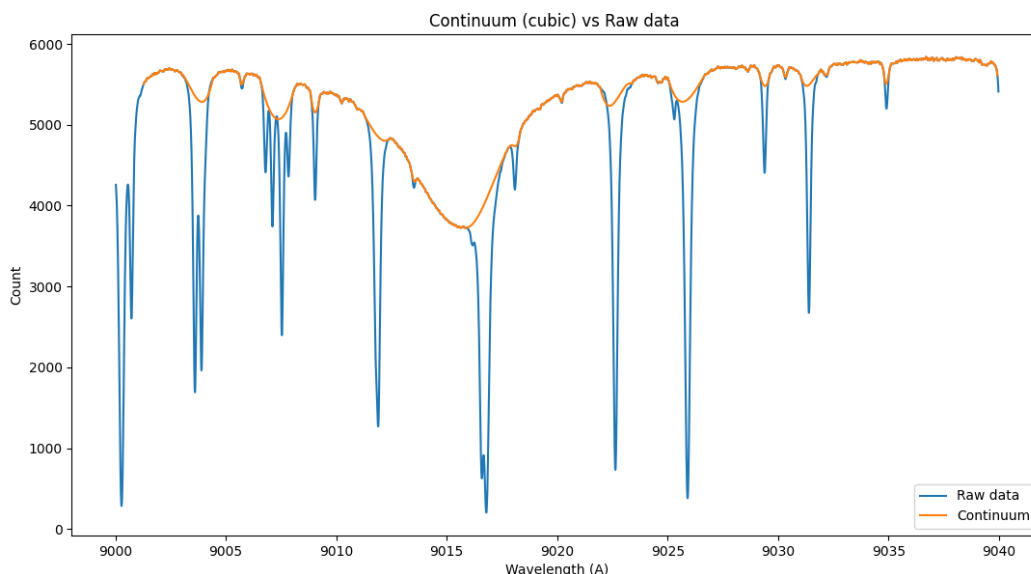
```
# Produce Continuum in absorption regions for generating Continuum
```

```
f2 = interp1d(x_continuum, y_continuum, kind='cubic')
y_Continuum = f2(xC0)
x_Continuum = xC0
```

شکل ۴-۱۴: حذف مناطق بی‌اثر در درونیابی و تولید منحنی زنجیره



شکل ۴-۱۵: منحنی زنجیره (درونیابی با چندجمله‌ای درجه ۱) در مقابل طیف خام



شکل ۴-۱۶: منحنی زنجیره (درون‌یابی با چندجمله‌ای درجه ۳) در مقابل طیف خام

### ۳-۴ مرحله سوم: تولید طیف اصلاح شده (به مانند خارج از جو زمین)

برای کسب توانایی در محاسبات باقیمانده، ابتدا بایستی آن دسته از داده‌های کسر انتقال، متناظر با طول موج‌های منحنی زنجیره را، از طیف جذب مصنوعی جدا نمود (شکل ۴-۱۷).

# Keep the Synthetic transmission fraction data in the Continuum wavelength region,  
# to obtain comparison ability

```
YYC = []
m = 0
for i in xx:
    if min(x_continuum) < i < max(x_continuum):
        YYC.append(YY[m])
        m = m + 1
    else:
        m = m + 1
```

شکل ۴-۱۷: جداسازی کسرهای انتقال متناظر با طول موج‌های طیف زنجیره

با ضرب مقادیر count منحنی زنجیره در کسر انتقال متناظر با طول موج‌های طیف زنجیره، طیفی که در آن آثار جو زمین و خطوطی که تنها شامل آثار خود ستاره می‌باشد، تولید می‌گردد (شکل ۴-۱۸).

```
# Amount of multiplication of Continuum's count and Synthetic transmission fraction
```

```
YYm = (YYC)*(y_Continuum)
```

شکل ۴-۱۸: رابطه ضرب برای تولید طیفی که در آن آثار جو زمین و خطوطی که تنها شامل آثار خود ستاره می‌باشد.

حال بایستی آن دسته از داده‌های count طیف خام، متناظر با طول موج‌های منحنی زنجیره را، از طیف خام جدا نموده و برای مشخص کردن سهم مربوط به ستاره، در خطوطی که شاهد تاثیر هم جو و هم ستاره هستیم، مقادیر count طیف خام باقیمانده را بر مقادیر count حاصل ضربی، در هر طول موج تقسیم کنیم (شکل ۴-۱۹).

```
# Keep the Raw data' count in the Continuum wavelength region  
# to obtain comparison ability
```

```
yyC = []  
q = 0  
for i in xx:  
    if min(x_continuum) < i < max(x_continuum):  
        yyC.append(yy[q])  
        q = q + 1  
    else:  
        q = q + 1
```

```
# Specify the star effect in the Raw data
```

```
Ratio = (yyC)/(YYm)
```

شکل ۴-۱۹: برنامه‌ای برای مشخص کردن سهم مربوط به ستاره

در نهایت با ضرب مقادیر سهم مربوط به ستاره در مقادیر count منحنی زنجیره، طیف اصلاح شده که گویی در بالای جو زمین طیف‌سنجی شده است، تولید خواهد شد (شکل ۴-۲۰ و ۴-۲۱).

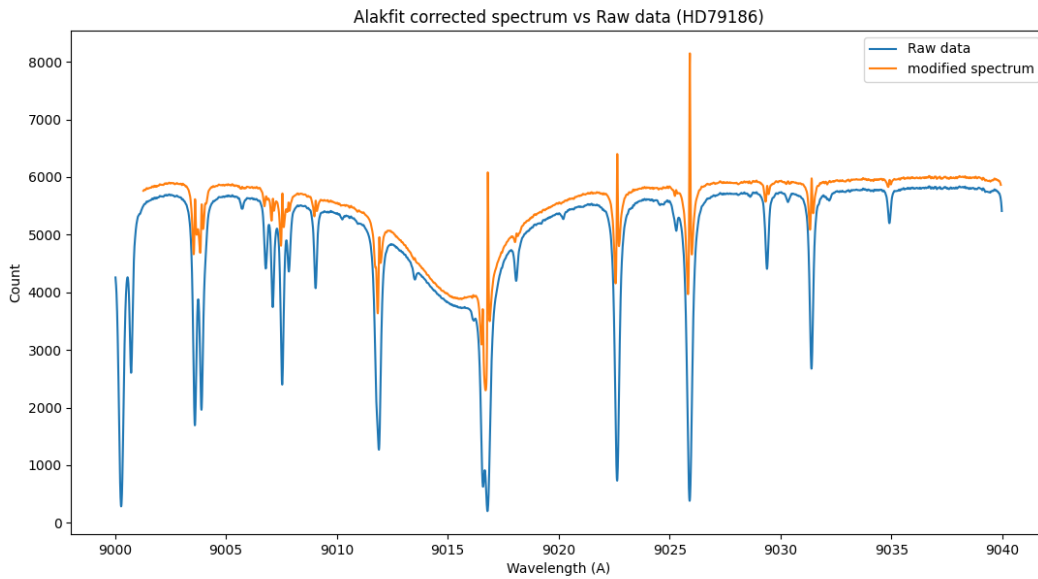
```
# To obtain the modified spectrum, multiply the Ratio in the amount of Continuum' count
```

```
Alakfit = (Ratio)*(y_Continuum)
```

```
# Plotting Raw data and modified spectrum together
```

```
plt.plot(xx, yy, x_Continuum, Alakfit)  
plt.legend(['Raw data', 'modified spectrum'], loc='best')  
plt.show()
```

شکل ۴-۲۰: برنامه‌ای برای مرحله نهایی تولید طیف اصلاح شده و رسم آن به همراه طیف خام



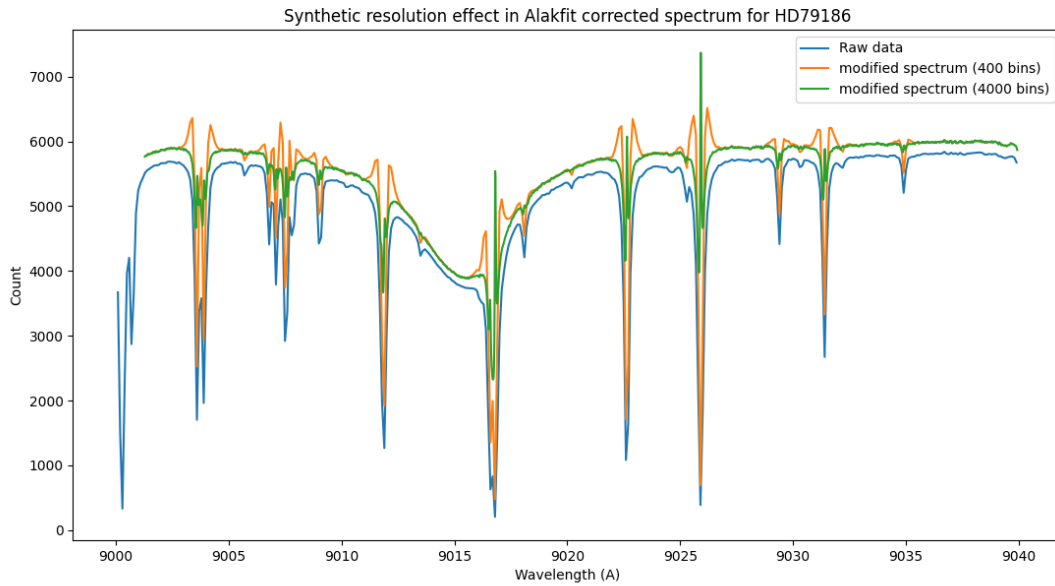
شکل ۴-۲۱: طیف اصلاح شده و طیف خام

#### ۴-۴ بررسی اثر متغیرهای آزاد

در این بخش قصد داریم اثر تغییرات ۳ متغیر آزاد موجود در برنامه یعنی وضوح طیف جذب مصنوعی، کسر انتقال حدی برای حذف خطوط تلوریک و درجه‌ی چندجمله‌ای برای درون‌یابی‌ها را بررسی کنیم.

##### ● وضوح طیف جذب مصنوعی

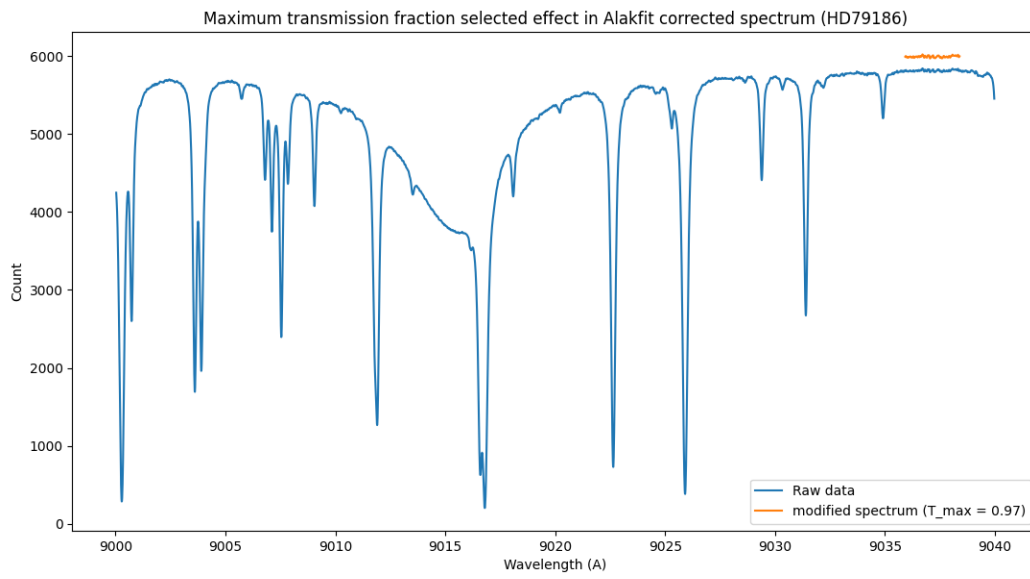
همانگونه که در شکل ۴-۲۲ قابل مشاهده می‌باشد، با بالا بردن وضوح طیف جذب ساختگی، طیف اصلاح شده‌ی بهتری را دریافت خواهیم نمود و لذا توصیه می‌گردد، از بالاترین وضوح ممکن برای تولید طیف جذب مصنوعی در بازه‌ی طول موجی داده‌ها استفاده شود.



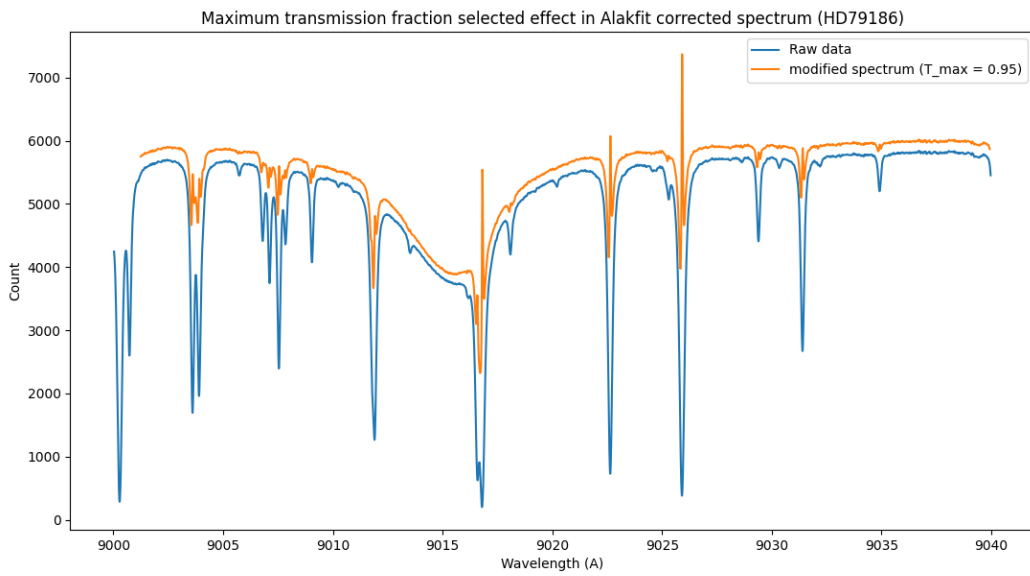
شکل ۴-۲۲: مقایسه طیف اصلاح شده، به وسیله طیف جذب مصنوعی با وضوح ۴۰۰ و ۴۰۰۰ شبکه

- کسر انتقال حدی برای حذف خطوط تلوریک

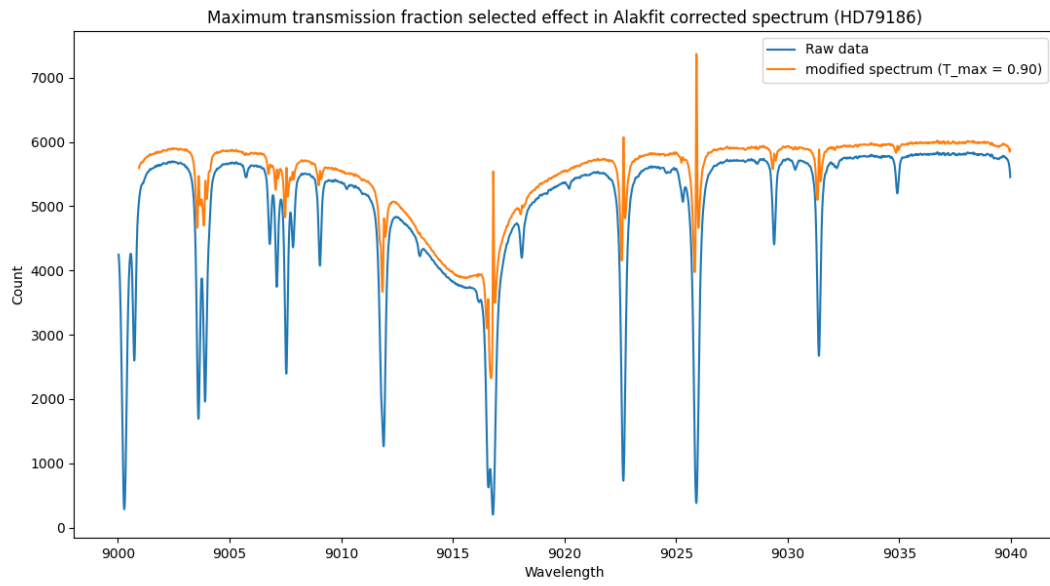
در ادامه تاثیر تغییرات کسر انتقال حدی، به عنوان حدی برای انتخاب بازه‌های طول موجی برای حذف خطوط تلوریک، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همانگونه که در شکل ۴-۲۳، ۴-۲۴ و ۴-۲۵ مشخص می‌باشد، از انتخاب مقدار  $0/954$  (شکل ۴-۲۶) روبه پایین، برای حد کسر انتقال، تفاوتی در طیف اصلاح شده وجود ندارد، بنابراین از این مقدار در برنامه استفاده می‌شود.



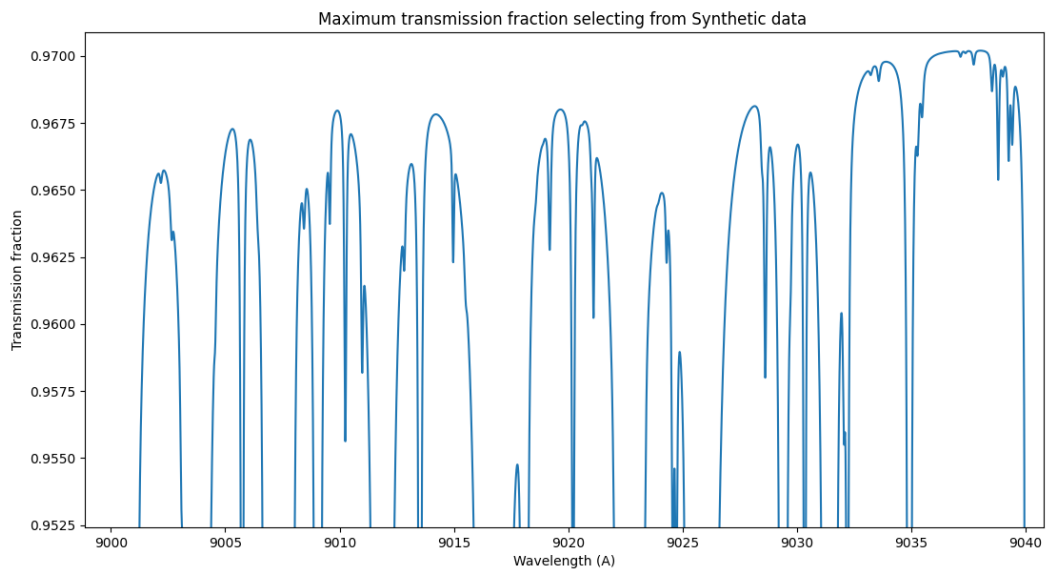
شکل ۴-۲۳: طیف اصلاح شده در مقدار حدی کسر انتقال = ۰/۹۷



شکل ۴-۲۴: طیف اصلاح شده در مقدار حدی کسر انتقال = ۰/۹۵



شکل ۴-۲۵: طیف اصلاح شده در مقدار حدی کسر انتقال = ۰/۹۰

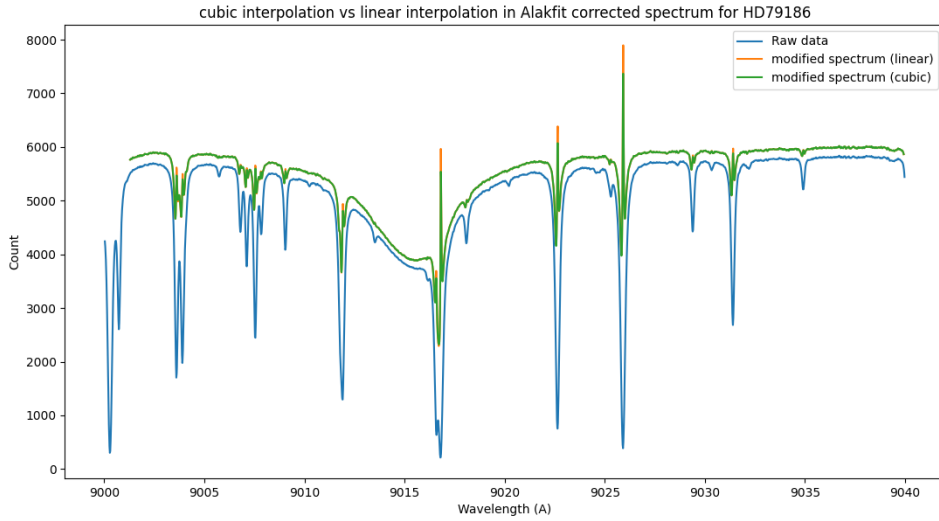


شکل ۴-۲۶: انتخاب بزرگترین کسر انتقال ممکن از طیف جذب مصنوعی، برای تولید طیف اصلاح شده



- درجه‌ی چندجمله‌ای برای درونیابی‌ها

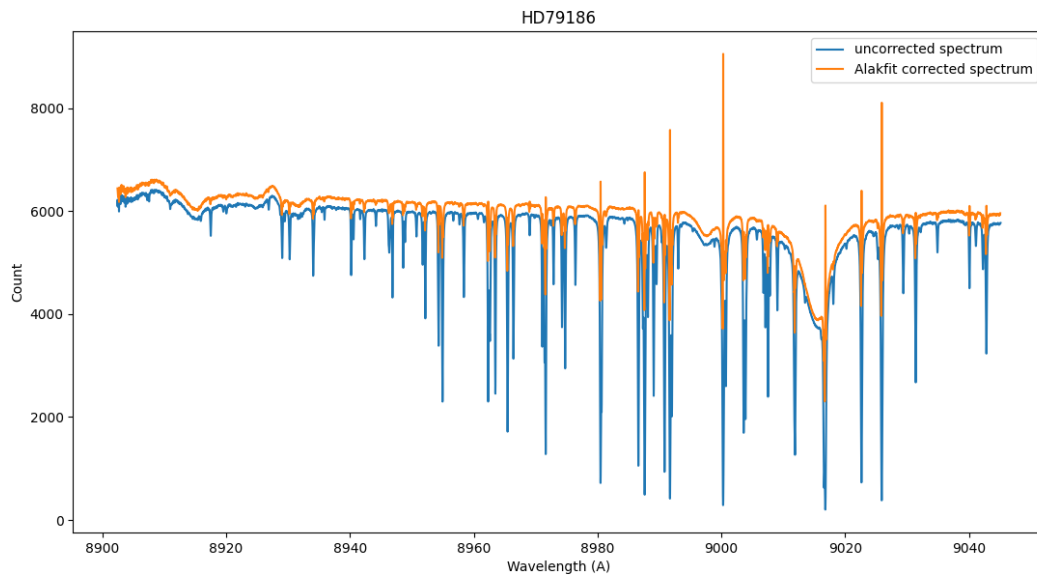
در نهایت با توجه به شکل ۴-۲۷ شاهد این موضوع هستیم که با انتخاب چندجمله‌ای‌هایی با درجه‌ی بالاتر برای درونیابی، در حد خیلی ناچیز، طیف اصلاح شده‌ی بهتری خواهیم داشت.



شکل ۴-۲۷: مقایسه طیف اصلاح شده به وسیله چندجمله‌ای درونیاب درجه یک و سه

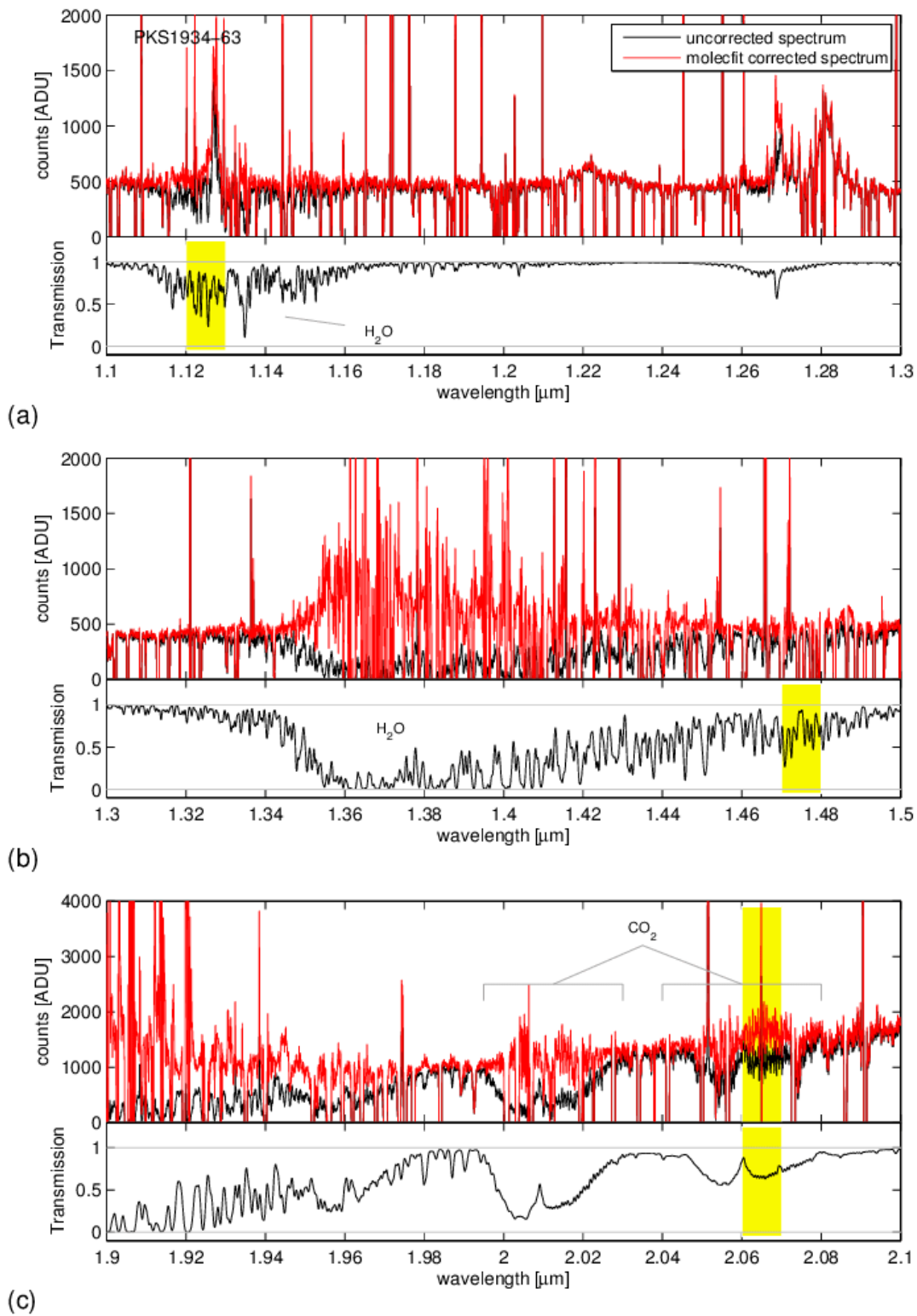
## ۴-۵ مقایسه کیفیت نتایج تمرین با کیفیت نتایج دیگر برنامه‌ها

به دلیل دسترسی نداشتن به طیف اصلاح شده‌ی HDV۹۱۸۶ توسط Molecfit و طیف خام نمونه‌های اصلاح شده‌ی دیگر توسط Molecfit، تنها به مقایسه کیفی طیف اصلاح شده‌ی کامل HDV۹۱۸۶ توسط برنامه‌ی Alakfit<sup>۴</sup> و طیف اصلاح شده‌ی توسط Molecfit بسنده می‌کنیم.



شکل ۴-۲۸: اصلاح Alakfit

<sup>4</sup>Ali Akbar Kavei FITing



شکل ۴-۲۹: اصلاح Molecfi

## ۴-۶ محدودیت‌ها

عدم وجود پروفایل‌های جوی شامل دما  $T$ ، فشار  $p$  و نسبت مخلوط کردن حجم  $x$  از چندین گونه مولکولی به عنوان تابعی از ارتفاع  $h$ ، برای آسمان ایران، امکان تولید طیف جذب مصنوعی به منظور بومی‌سازی برنامه، برای رصدخانه ملی ایران را از ما گرفته است.

در صورت وجود این پروفایل‌های هواشناسی، می‌توان آن‌ها را به همراه ضرایب جذب مربوط به هر طول موج و موقعیت سماوی هدف، به عنوان ورودی گرفته و با استفاده از روابطی نظیر ۲-۵۰ و ۲-۵۲، طیف جذب مصنوعی را تولید نمود.

## فصل ۵

### بحث و نتیجه‌گیری

در این فصل قصد داریم تا برنامه‌های موجود برای تصحیح خطوط تلوریک را با یکدیگر مقایسه کنیم. در ابتدا لازم به ذکر می‌باشد، با توجه به اینکه برنامه‌ی SKYCALC [۲]، خطوط جذبی را به وسیله‌ی برنامه‌ی Molecfit [۱] و خطوط نشری را به وسیله‌ی برنامه‌ی Skycorr [۱۹] مدل می‌کند، با مقایسه Molecfit با TAPAS [۱۰] و TelFit [۹]، دیگر نیازی به وارد کردن SKYCALC در این مقایسه نمی‌باشد. در ادامه با استفاده از نتایج بدست آمده در مقاله (۲۰۱۹) Ulmer-Moll et al. [۱۱]، کیفیت تصحیح سه برنامه‌ی Molecfit، TAPAS و TelFit را با یکدیگر مقایسه خواهیم نمود.

## ۵-۱ مقایسه

خلاصه‌ای از قابلیت‌ها و مدل‌های به کار رفته در هر یک از این برنامه‌ها، در شکل زیر قابل مشاهده می‌باشد.

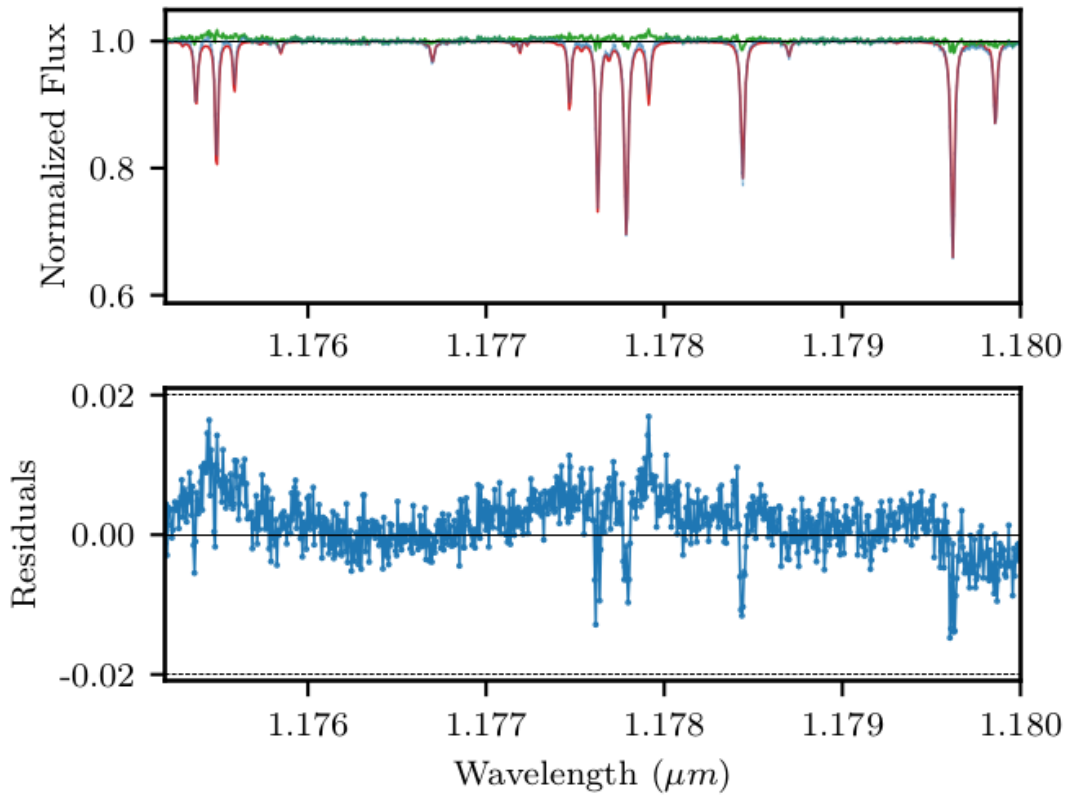
Characteristics	<i>Molecfit</i>	TelFit	TAPAS
Wavelength coverage ( $\mu\text{m}$ )	0.3-30	0.3-2.4	0.35-2.5
Radiative transfer code	LBLRTM	LBLRTM	LBLRTM
Spectroscopic database	HITRAN 2008/12	HITRAN 2008/12	HITRAN
Weather models database	GDAS	GDAS	ETHER
Default atmospheric profile	Merged	Mid-latitude	Arletty
Other atmospheric profiles	Equatorial, Mid-latitude	GDAS	Equatorial, Mid-latitude
Automatic download profile	✓	✗	✗
Fitting atmospheric transmission	✓	✓	✗
Atmospheric transmission options:			
Molecules: $H_2O$ , $CO_2$ , $O_3$ , $N_2O$ , $CH_4$ , $O_2$	✓	✓	✓
$CO$ , $NO$ , $SO_2$ , $NO_2$ , $NH_3$ , $HNO_3$	✓+11 others	✓	✗
Transmission spectrum of individual molecule	✗	✗	✓
Resolution	✗	✓	✓
Gaussian line shape	✓	✓	✓
Lorentzian line shape	✓	✗	✗
Voigt line shape	✓	✗	✗
Singular value decomposition	✗	✓	✗
Fitting parameters:			
Molecule	✓	✓	(...)
Resolution/line shape	✓	✓	(...)
Wavelength correction	✓	✓	(...)
Continuum correction	✓	✓	(...)
Telescope background emission	✓	✗	(...)

شکل ۵-۱: مقایسه پارامترسازی برای مدل‌سازی در روش‌های مختلف اصلاح تلوریک.

از آنجا که مشاهدات ستاره‌ای استاندارد را داریم، اصلاح خطوط تلوریک را نیز با استفاده از روش ستاره استاندارد تلوریک انجام می‌دهیم.

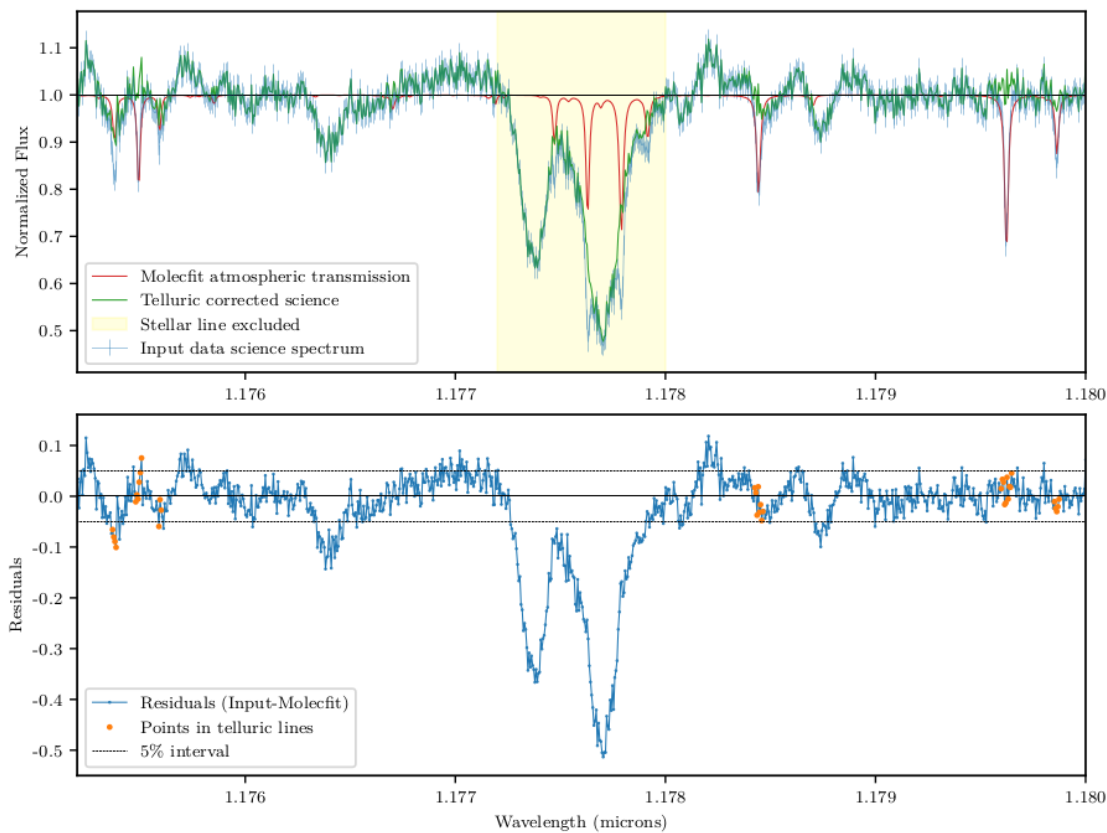
## ۵-۱-۱ مثال‌هایی برای تصحیح

در این بخش دو نمونه از طیف تصحیح تلوریک، به دست آمده با مجموعه‌ی داده‌ها، ارائه شده است. نمونه‌هایی از نتایج اصلاح تلوریک با چهار روش فوق در انتهای همین فصل ارائه شده است. در شکل ۴-۲، نمونه‌ای از اصلاح تلوریک با استفاده از *Molecfit* برای طیف ستاره استاندارد، نشان داده شده است. در این محدوده از طول موج، جذب  $H_2O$  غالب است و سطح اصلاح با باقیمانده‌های زیر ۲٪، بالا می‌باشد.



شکل ۵-۲: طیف ستاره استاندارد با Molecfit اصلاح شده است. بالا: طیف ورودی با رنگ آبی، انتقال اتمسفر Molecfit با رنگ قرمز، طیف اصلاح شده با سبز نشان داده شده است. پایین: باقیمانده‌ای که پس از تفریق انتقال جوی از طیف ورودی بدست می‌آید.

شکل ۴-۳ اصلاح تلوریک طیف هدف را در همان دامنه طول موج نشان می‌دهد. اصلاح تلوریک نیز با Molecfit انجام شده است. طیف ورودی با نوارهای خطا به رنگ آبی رسم شده است، انتقال Molecfit فیت شده به رنگ قرمز است و نشان می‌دهد که با تمام خطوط تلوریک به خوبی مطابقت دارند. خطوط تلوریک در سطح نویز طیف، اصلاح می‌شوند. باقیمانده، تفاوت بین طیف ورودی و انتقال جوی در قسمت پایین نشان داده شده است.



شکل ۵-۳: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با Molecfit. بالا: طیف ورودی ستاره هدف با رنگ آبی نشان داده شده است، انتقال اتمسفر Molecfit با رنگ قرمز و طیف اصلاح شده با سبز نشان داده شده است. خطوط ستاره‌ای مستثنی به رنگ زرد روشن نشان داده شده‌اند. پایین: باقیمانده بین طیف ورودی و انتقال اتمسفر. خطچین‌ها حدود ۰.۵٪ بالا و پایین را نشان می‌دهند. نقاطی که به خطوط تلوریک تعلق دارند و با خطوط ستاره‌ای مشترک نیستند، به رنگ نارنجی مشخص شده‌اند.

در مرحله‌ی بعد، خطوط ستاره‌ای قوی K I را شناسایی کرده و در بیرون از این مناطق، میانگین و انحراف معیار باقیمانده را محاسبه و در شکل ۴-۴ و ۴-۶ نشان داده شده‌اند. در شکل‌های ۴-۵ و ۴-۷، فقط نقاط داخل خطوط تلوریک انتخاب شده است. بنابراین، تغییرات گسترده ستاره‌ای از اندازه‌گیری‌های انحراف معیار حذف می‌شوند.

## ۵-۱-۲ جذب $H_2O$

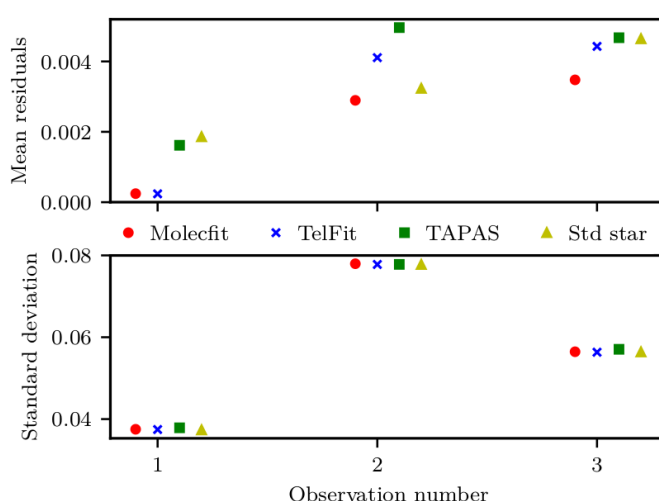
اصلاح تلوریک به دست آمده با TelFit، Molecfit، TAPAS و روش ستاره استاندارد تلوریک، در محدوده طول موج ۱/۱۶۶ تا ۱/۱۸۸ میکرومتر که  $H_2O$  جذب کننده اصلی است، مقایسه می‌شوند. شکل



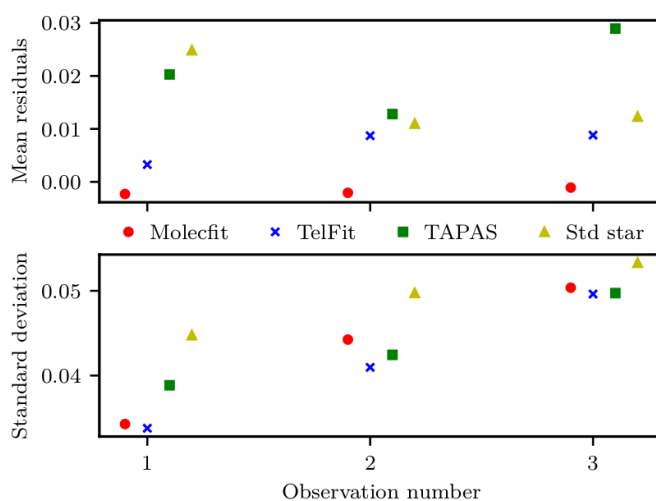
۴-۴ میانگین و انحراف معیار باقیمانده برای سه مشاهده را نشان می‌دهد. در حالت ایده‌آل، میانگین باقیمانده‌ها باید صفر باشد. برای TelFit و Molecfit در اولین مشاهده، باقیمانده بسیار نزدیک به صفر است. برای دو مشاهده‌ی دیگر، TelFit و Molecfit به ترتیب حدود ۰/۴٪ و ۰/۳٪ باقیمانده دارند. بسته TAPAS و روش ستاره استاندارد تلوریک، برای مشاهدات اولیه نزدیک به ۰/۲٪ و حدود ۰/۳-۰/۴٪، برای مشاهدات ۲ و ۳ باقیمانده دارند.

یک میانگین مثبت می‌تواند نشان دهد که خطوط تلوریک ممکن است اصلاح نشده باشند، به این معنی که خط مدل شده به اندازه خط طیف ورودی عمیق نیست. انحراف معیار باقیمانده نیز باید به صفر برسد. با این حال، ما در اینجا توسط یک پراکندگی بزرگ که در طیف‌ها وجود دارد محدود شده‌ایم. به نظر می‌رسد انحراف معیار باقیمانده تنها تحت تأثیر مشاهده قرار می‌گیرد، نه روش تصحیح استفاده شده.

شکل ۴-۵ شبیه به شکل قبلی است، جز اینکه با نقاط داخل خطوط تلوریک محاسبه شده‌اند. پراکندگی و باقیمانده Molecfit و TelFit، به طور کلی نسبت به روش ستاره استاندارد تلوریک، کمتر است. باقیمانده Molecfit نزدیکترین به صفر است. همچنین، TAPAS پراکندگی کمتری نسبت به روش ستاره استاندارد تلوریک دارد، اما باقیمانده آن برای مشاهدات ۲ و ۳ بیشتر است. در این بازه‌ی طول موجی، تحت تأثیر جذب آب، نتیجه می‌گیریم که Molecfit، TelFit و TAPAS اصلاح تلوریک بهتری نسبت به ستاره استاندارد تلوریک ارائه می‌دهند.



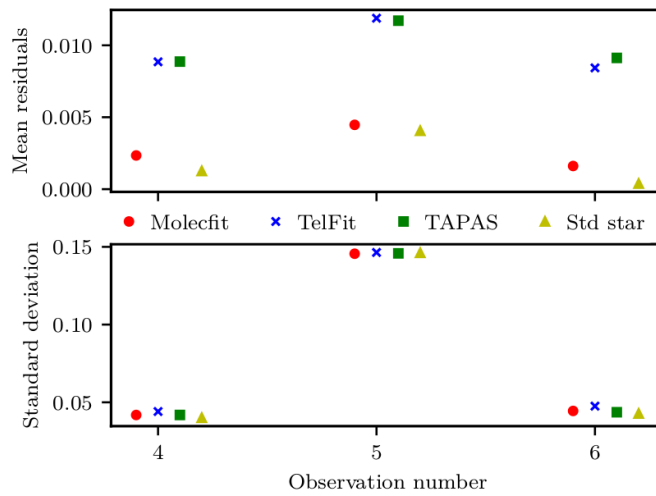
شکل ۴-۵: میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌های کلیه نقاط به جز خطوط ستاره‌ای برای چهار روش اصلاح تلوریک Molecfit (دایره قرمز)، TelFit (ضربدر آبی) و TAPAS (مربع سبز) و روش ستاره استاندارد تلوریک (مثلث زرد) در محدوده‌ی طول موج تحت سلطه جذب  $H_2O$ .



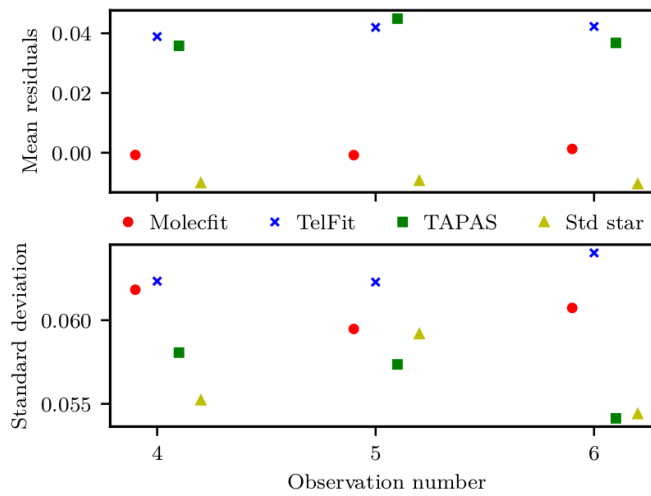
شکل ۵-۵: میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌ها در داخل خطوط تلوریک برای چهار روش اصلاح تلوریک در محدوده‌ی طول موج تحت سلطه جذب  $H_2O$ . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۴ است.

### ۵-۱-۳ جذب $O_2$

در این بخش اصلاح تلوریک بدست آمده با چهار روش در محدوده طول موج  $1/247$  تا  $1/272$  میکرومتر، مقایسه می‌شوند، جایی که  $O_2$  جذب کننده اصلی است. در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷ به ترتیب جابجایی و پراکندگی باقیمانده‌ها برای همه نقاط (به استثنای خطوط ستاره‌ای K I) و برای نقاط داخل خطوط تلوریک ارائه شده است. Molecfit و روش ستاره استاندارد تلوریک به وضوح باقیمانده‌های کوچکتر، همیشه کمتر از  $0.5\%$  را برای همه مشاهدات ایجاد می‌کنند (شکل ۴-۶). باز هم پراکندگی باقیمانده‌ها برای همه روش‌ها برابر است. برای باقیمانده‌های داخل خطوط تلوریک (شکل ۴-۷)، کوچکترین باقیمانده‌ها با Molecfit و روش ستاره استاندارد تلوریک، دیده می‌شود. حتی اگر میانگین باقیمانده‌ها Molecfit در داخل خطوط تلوریک به صفر نزدیک باشد، Molecfit در مقایسه با روش ستاره استاندارد تلوریک و TAPAS، پراکندگی بیشتری را در داخل خطوط تلوریک نشان می‌دهد. تصحیح خطوط تلوریک  $O_2$  به وضوح برای TAPAS، Molecfit و TelFit چالش برانگیزتر است.



شکل ۵-۶: میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌های کلیه نقاط به جز خطوط ستاره‌ای برای چهار روش تصحیح تلوریک در محدوده‌ی طول موج تحت سلطه جذب  $O_2$ . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۴ است.



شکل ۵-۷: میانگین و انحراف معیار باقیمانده‌ها در داخل خطوط تلوریک برای چهار روش اصلاح تلوریک در محدوده‌ی طول موج جذب  $O_2$ . کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۴ است.

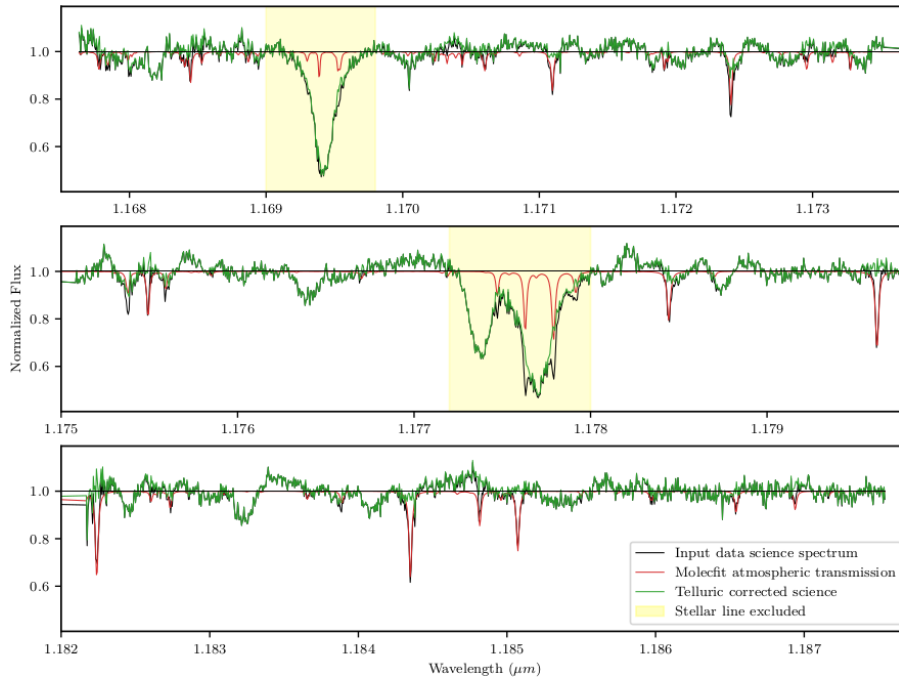
## ۲-۵ نتیجه‌گیری

روش ستاره استاندارد تلوریک دارای معایب مختلفی است، مانند اختلاف زمان و جرم هوای بین مشاهدات ستاره هدف و ستاره استاندارد تلوریک، که منجر به ایجاد طیف‌های انتقال جوی کمی متفاوت است. مشکل دیگر از دست دادن زمان تلسکوپ است که برای مشاهده ستاره‌های استاندارد تلوریک صرف می‌شود. استفاده از طیف‌های انتقال مصنوعی برای مدل‌سازی جذب تلوریک، علاوه بر صرفه‌جویی در وقت مشاهده، فرصت خوبی برای اصلاح داده‌های بایگانی شده‌ای پدید می‌آورد که هیچ ستاره استاندارد مناسبی برای آن‌ها مشاهده نشده است. برای محدوده‌ی طول موج‌های تحت تأثیر جذب آب، متوجه شدیم که روش‌های انتقال مصنوعی، تصحیح تلوریک دقیق‌تری ارائه می‌دهند. در داخل خطوط تلوریک آب، روش‌های انتقال مصنوعی پراکندگی سیستماتیک کمتری نسبت به روش ستاره استاندارد تلوریک دارند. حداکثر، روش ستاره استاندارد تلوریک دارای پراکندگی  $1/3$  برابر بزرگتر از Molecfit است. ما این موضوع را اینگونه تفسیر می‌کنیم که جذب آب به سرعت از نظر زمان تغییر می‌کند و استفاده از انتقال مصنوعی جو به ما امکان می‌دهد این تغییرات سریع را بهتر از روش ستاره استاندارد تلوریک، حساب کنیم.

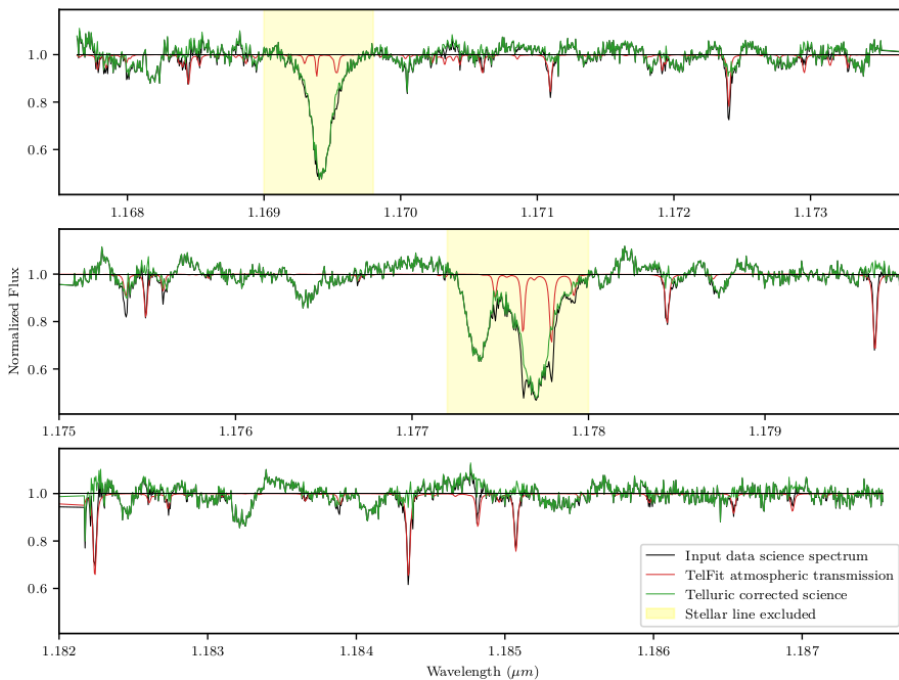
برای محدوده‌ی طول موجی که تحت تأثیر جذب اکسیژن است، روش ستاره استاندارد تلوریک عملکرد بهتری دارد. روش‌های انتقال مصنوعی پراکندگی باقیمانده را تا  $1/2$  برابر بیشتر از روش ستاره استاندارد تلوریک، نشان می‌دهند. با دقت بیشتر در داخل خطوط تلوریک، Molecfit پراکندگی بالاتری نسبت به روش ستاره استاندارد تلوریک ارائه می‌دهد، اما باقیمانده‌ی کمتری دارد.

برنامه‌های Telfit و TAPAS منجر به باقیمانده‌ای در حدود  $1\%$  می‌شود. در نهایت و به طور کلی، Molecfit و Telfit پراکندگی کمتری نسبت به TAPAS دارند، مخصوصاً در جرم‌های کم که پراکندگی به دست آمده با TAPAS دو برابر بیشتر است.

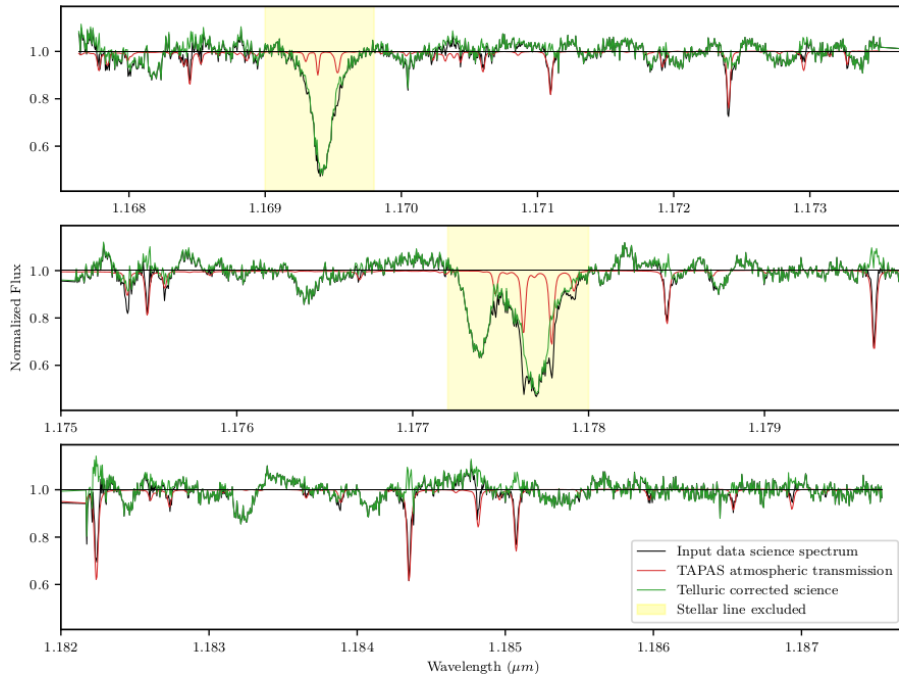
در ادامه و در انتهای کار، شاهد نمونه‌هایی از نتایج اصلاح تلوریک با چهار روش فوق، خواهیم بود.



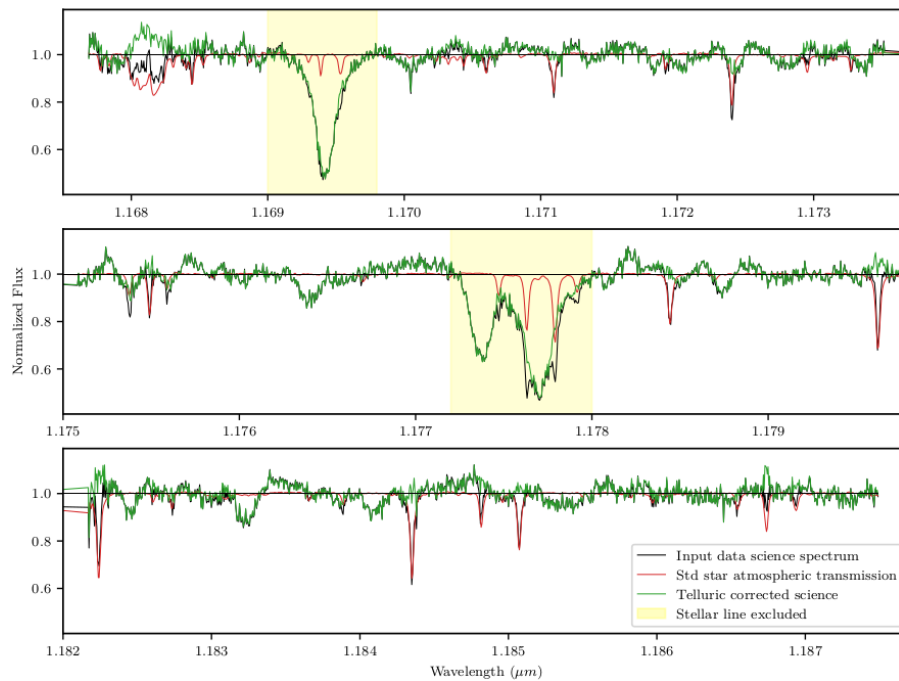
شکل ۵-۸: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده‌ی تلوریک با Molecfit. طیف ورودی با رنگ سیاه نشان داده شده است، طیف انتقال جوی با رنگ قرمز و طیف اصلاح شده‌ی تلوریک با رنگ سبز.



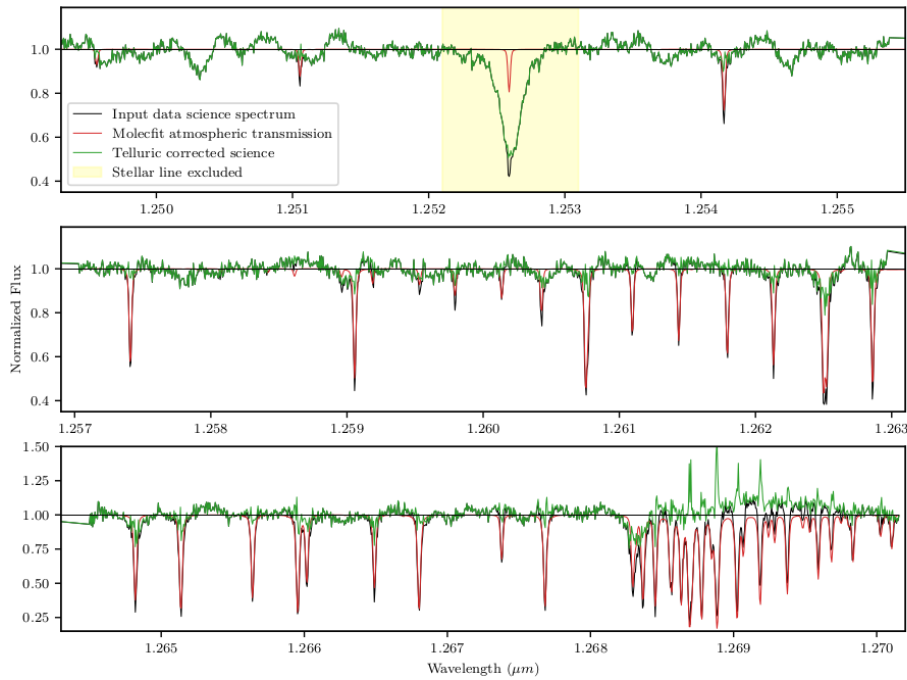
شکل ۵-۹: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده‌ی تلوریک با TelFit. کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد.



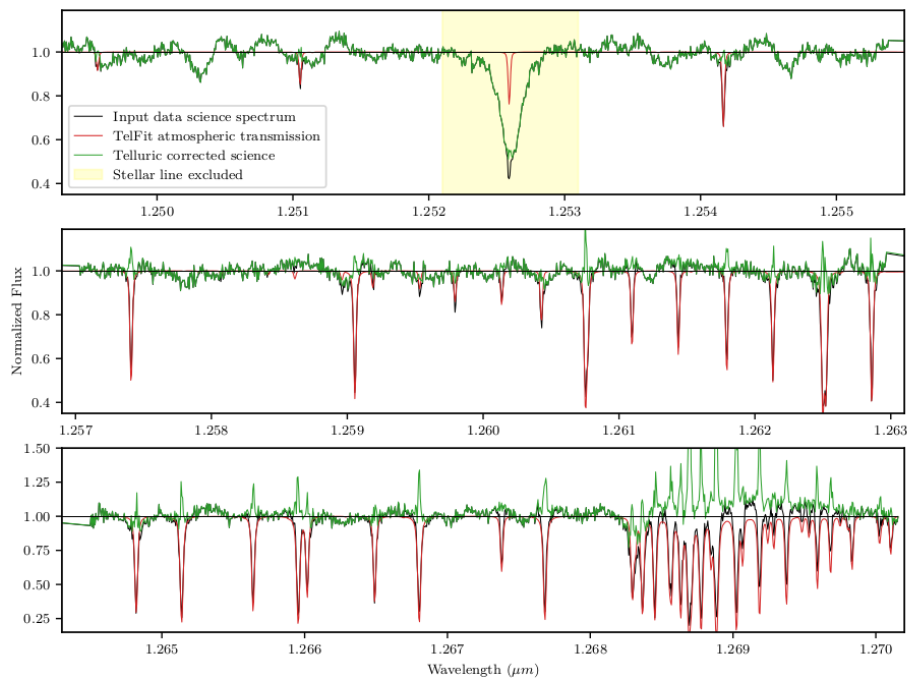
شکل ۵-۱۰: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با TAPAS. کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد.



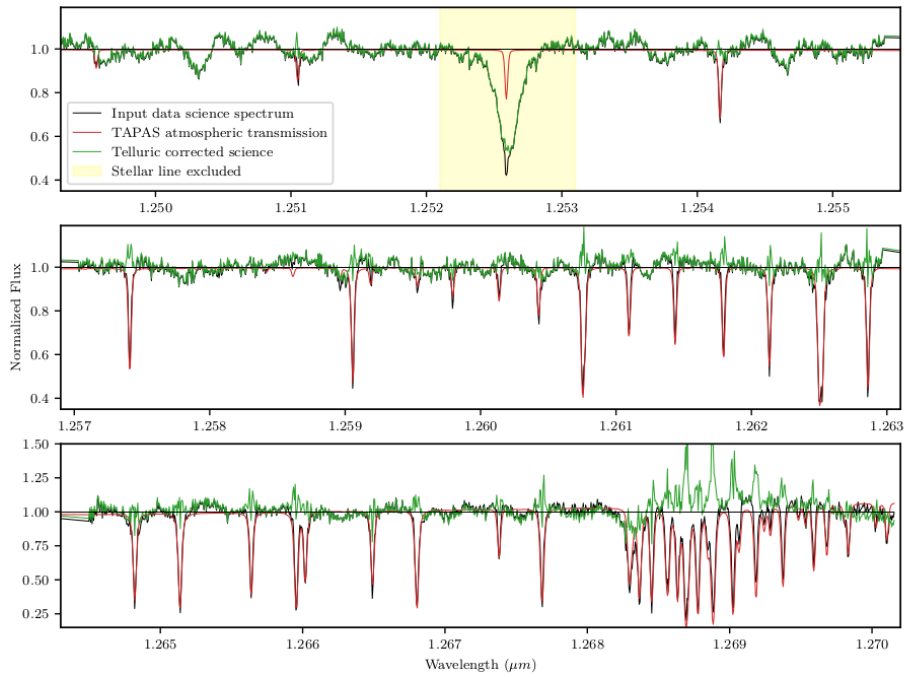
شکل ۵-۱۱: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با ستاره استاندارد تلوریک. کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد.



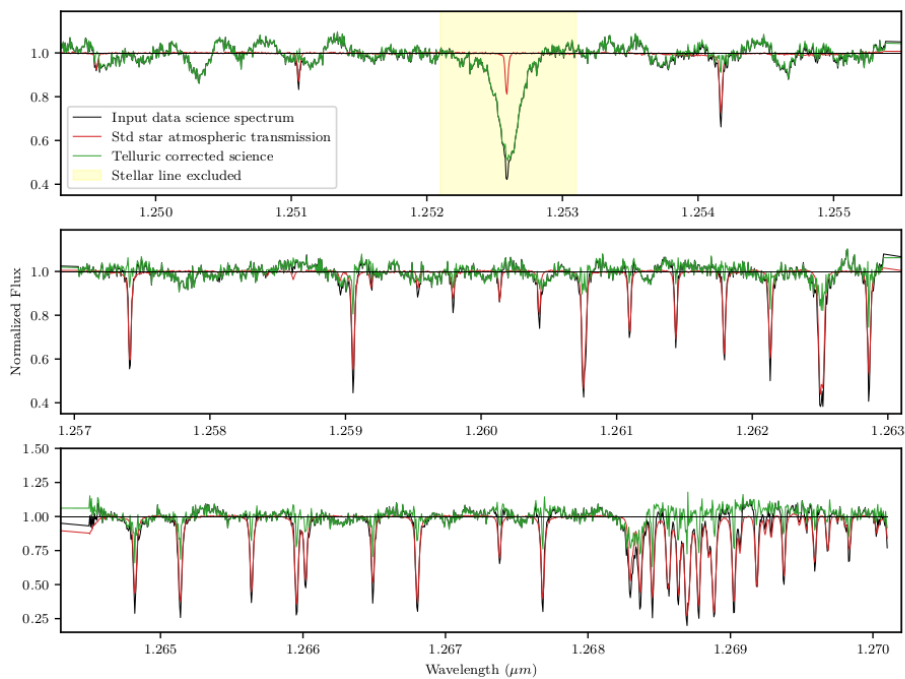
شکل ۵-۱۲: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با Molecfit. کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد.



شکل ۵-۱۳: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با TelFit. کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد.



شکل ۵-۱۴: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با TAPAS. کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد.



شکل ۵-۱۵: نمونه‌ای از یک طیف اصلاح شده تلوریک با ستاره استاندارد تلوریک. کد رنگ‌ها همانند شکل ۴-۸ می‌باشد.



## مراجع

- [1] Smette, A. Sana, H. Noll, S. Horst, H. Kausch, W. Kimeswenger, S. Barden, M. Szyszka, C. Jones, A. M. and Gallenne, A. and Vinther, J. Ballester, P. and Taylor, J. Molecfit: A general tool for telluric absorption correction. I. Method and application to ESO instruments. , 576:A77, Apr 2015.
- [2] Noll, S. Kausch, W. Barden, M. Jones, A. M. Szyszka, C. Kimeswenger, S. and Vinther, J. An atmospheric radiation model for Cerro Paranal. I. The optical spectral range. , 543:A92, Jul 2012.
- [3] <https://www.eso.org/public/>
- [4] Bailey, Jeremy, Simpson, Andrew, and Crisp, David. Correcting Infrared Spectra for Atmospheric Transmission. , 119(852):228–236, Feb 2007.
- [5] Meadows, V. S. and Crisp, D. Ground-based near-infrared observations of the Venus nightside: The thermal structure and water abundance near the surface. , 101(E2):4595–4622, Jan 1996.
- [6] Seifahrt, A., Kudfl, H. U., Zingl, G., Bean, J. L., Richter, M. J., and Siebenmorgen, R. Synthesising, using, and correcting for telluric features in high-resolution astronomical spectra . A near-infrared case study using CRIRES. , 524:A11, Dec 2010.
- [7] Clough, S. A., Shephard, M. W., Mlawer, E. J., Delamere, J. S., Iacono, M. J., Cady-Pereira, K., Boukabara, S., and Brown, P. D. Atmospheric radiative transfer modeling: a summary of the AER codes. , 91(2):233–244, Mar 2005.
- [8] Rothman, L. S., Gordon, I. E., Barbe, A., Benner, D. Chris, Bernath, P. F., Birk, M., Boudon, V., Brown, L. R., Campargue, A., Champion, J. P., Chance, K., Coudert, L. H., Dana, V., Devi, V. M., Fally, S., Flaud, J. M., Gamache, R. R., Goldman, A., Jacquemart,

- D., Kleiner, I., Lacombe, N., Lafferty, W. J., Mand in, J. Y., Massie, S. T., Mikhailenko, S. N., Miller, C. E., Moazzen-Ahmadi, N., Naumenko, O. V., Nikitin, A. V., Orphal, J., Perevalov, V. I., Perrin, A., Predoi-Cross, A., Rinsland, C. P., Rotger, M., Kimeckov, M., Smith, M. A. H., Sung, K., Tashkun, S. A., Tennyson, J., Toth, R. A., Vandaele, A. C., and Vander Auwera, J. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database. , 110(9-10):533–572, Jun 2009.
- [9] Kevin Gullikson and Sarah Dodson-Robinson and Adam Kraus CORRECTING FOR TELLURIC ABSORPTION: METHODS, CASE STUDIES, AND RELEASE OF THE TELFIT CODE. , arXiv:1406.6059v1, Aug 2014.
- [10] Bertaux, J. L. and Lallement, R. and Ferron, S. and Boone, C. and Bodichon, R. TAPAS, a web-based service of atmospheric transmission computation for astronomy. , 564:A46, Apr 2014.
- [11] Ulmer-Moll, S. and Figueira, P. and Neal, J. J. and Santos, N. C. and Bonnefoy, M. Telluric correction in the near-infrared: Standard star or synthetic transmission?. , 621:A79, Jan 2019.
- [12] [https://www.cambridge.org/sa/files/6813/6689/9167/1076\\_161467.pdf](https://www.cambridge.org/sa/files/6813/6689/9167/1076_161467.pdf)
- [13] Griffiths, David J. Introduction to Quantum Mechanics (2nd Edition). Pearson Prentice Hall, 2nd ed. , April 2004.
- [14] Peraiah, A. An Introduction to Radiative Transfer: Methods and Applications in Astrophysics. Cambridge University Press, 2002.
- [15] <https://en.wikipedia.org/>
- [16] Hartmann, D.L. Global Physical Climatology. Elsevier Science, 1994.
- [17] <https://hitran.org/>
- [18] <https://www.eso.org/observing/etc/bin/gen/form?INS.MODE=swspectr+INS.NAME=SKYCALC>
- [19] Noll, S. and Kausch, W. and Kimeswenger, S. and Barden, M. and Jones, A. M. and Modigliani, A. and Szyszka, C. and Taylor, J. Skycorr: A general tool for spectroscopic sky subtraction. , 567:A25, Jul 2014.

Abstract:

When the light of celestial bodies passes through the Earth's atmosphere and is recorded by the spectrograph of terrestrial telescopes, it is affected by various absorptions from the Earth's atmosphere, such as nitrogen molecules, oxygen, water, and so on. This is while astronomers, interested in studying the spectrum of objects out of the atmosphere. One way to eliminate these effects is to use space telescopes, But this is very costly, so you have to look for another way to remove traces of the atmosphere from the ground.

The traditional method of astronomers is to use standard stars in which there are mostly only hydrogen effects, or in certain cases, to use G-type stars that are very similar to the Sun and have less hydrogen effect in their spectrum and are well known. For various reasons, such as climate changes, the relation of absorption with the celestial position, etc., these stars must be observed shortly before or after the main observation and in the same celestial position; it is more cost-effective to spend time using large telescopes to observe the main targets and correct atmospheric absorption effects in another way.

An alternative method is to solve radiative transfer equations with the presence of many atoms and molecules in the Earth's atmosphere. Examples of these equations can be found in programs such as Molecfit [1] and SKYCALC [2]. In these programs, radiative transfer equations are solved using recorded meteorological data and modeled using atomic transitions, absorption lines, or the emission of the Earth's atmosphere. These programs modify the spectrum well, but one of its disadvantages is that the correction of atmospheric lines is not always accurate due to the unknown atmospheric layers.

Our goal in this project is to understand the details of how this program works, try to localize it, and finally use it as a tool for the National Observatory of Iran.

Keywords: radiative transfer – atmospheric effects – spectroscopic – observational – data analysis



University of Tehran  
Faculty of Physics

# Telluric correction for absorption lines in the visible range

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree  
of Master of Science in Physics

By:

Aliakbar Kavei

Supervisor:

Dr. Mahdiyar Noorbala

Advisor:

Dr. Amin Farhang

February 2021