دانشکده فیزیک

گروه نظری و اختر فیزیک

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته فیزیک

عنوان

تعیین پارامترهای فیزیکی سیارات فرا خورشیدی با تحلیل منحنی نوری

استاد راهنما

دکتر داود محمدزاده جسور

استاد مشاور

دکتر میر حجت کرمانی

پژوهشگر

سارا سعیدی

بهمن ۱۳۸۹

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به

پدر و مادرم، به پاس زحمات بی دریغ شان

و

سینا و سروش عزیز

تقدیر و تشکر

پیش و بیش از همه از خانواده عزیزم، پدر و مادر دلسوز و فداکارم و خواهر و برادر مهربان و بی نظیرم، که طی این مرحله جز با توجه و دلسوزی و محبت های وصف ناپذیر آنها ممکن نبود سپاسگزارم، دریغ که در تقدیر از زحماتشان واژه ها چنانکه باید مرا یاری نمی کنند. در نهایت فروتنی سپاس بسیار دارم از استاد راهنمای گرانقدر و فرزانه جناب آقای دکتر جسور که هم از لحاظ علمی و هم از نظر اخلاق کاری، مسئولیت پذیری و نظم در امور از ایشان بسیار آموختم. از یاد نمی برم که ایشان همواره با سعه صدر پاسخگوی سؤالات من بودند و خرسندم از اینکه افتخار شاگردیشان را داشتم. از مشاور محترم جناب آقای دکتر کرمانی که در طول انجام این پروژه با راهنمایی های علمی و دقیق خود پشتیبان و راهگشای من بودند و بسیار ممنونم و زحماتشان را ارج می نهم. مراتب سپاسگزاری خود را به پیشگاه تمامی اساتید دانشکده فیزیک که بخت شاگردی و آموختن از ایشان را داشتم ابراز می کنم و نیز از کارمندان پر تلاش دانشکده که همواره با روی گشاده پاسخگوی مشکلات و مسائل آموزشی بودند نهایت تشکر را دارم. در پایان به نشانه وفاداری و قدرشناسی سر تعظیم خم می کنم بر آستان صفا و صمیمیت دوستان بسیار عزیزم که فرصت مغتنم مصاحبتشان برایم یگانه و بی بدیل بود. در داشتن چنین دوستان یکدل و همسخنی شکر گزار اقبال خویشم و هرگز فراموششان نخواهم کرد. . . باشد که همه عزیزان و سروران، همیشه و در هر کجا که هستند، شاد و سلامت و موفق باشند.

سارا سعیدی

نام خانوادگی: سعیدی **نام:** سارا

اساتید راهنما: دکتر داوود محمدزاده جسور
استاد مشاور: میر حجت کرمانی

عنوان پایان نامه: تعیین پارامترهای فیزیکی سیارات فراخورشیدی با تحلیل منحنی نوری

مقطع: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** اخترفیزیک
دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فیزیک **تعداد صفحه:** ۱۲۰ **تاریخ فارغ التحصیلی:** بهمن ۱۳۸۹

کلید واژه: سیاره فراخورشیدی، منحنی نوری، گرفت اول، گرفت دوم، تاریکی لبه، تاریکی گرانشی، اثر بازتابش، آنالیز فوریه، زاویه میل، خروج از مرکز

چکیده

تحلیل منحنی نوری یک سیستم سیاره-ستاره بیشترین اطلاعات را در مورد ویژگی‌های فیزیکی آن سیستم در اختیار ما قرار می‌دهد. با تحلیل منحنی نوری سیارات فرا خورشیدی می توان شعاع ستاره میزبان، شعاع سیاره، زاویه میل ، دما و خروج از مرکز مدار را تعیین کرد. به کمک بررسی منحنی های نوری یک سیستم که در زمان‌های مختلف بدست آمده‌اند، همچنین می توان از حضور سیارات دیگر در آن سیستم و نیز وجود قمر در سیاره مورد مطالعه نیز اطلاعاتی بدست آورد. زاویه میل که از تحلیل منحنی نوری بدست می آید در تعیین جرم سیاره و ستاره، که با تحلیل منحنی سرعت شعاعی فقط می‌توان کمینه مقدار آنها را بدست آورد یک پارامتر اساسی محسوب می‌شود.

در این پایان نامه، ابتدا منحنی نوری یک سیستم سیاره- ستاره را شبیه سازی کرده و سپس تأثیر هر یک از عوامل فیزیکی را بر منحنی نوری در مورد این سیستم ها به تفکیک بررسی کرده‌ایم. در مرحله بعد پارامترهای فیزیکی از جمله شعاع ستاره، شعاع سیاره و زاویه میل را با روش آنالیز فوریه در سیستم‌های سیاره- ستاره بدست آوردیم. این محاسبات ابتدا بدون در نظر گرفتن اثر تاریکی لبه و سپس با در نظر گرفتن این اثر انجام شده‌است.در مرحله سوم با منظور کردن اثر بازتابش در محاسبات آنالیز فوریه تأثیر این پدیده در مقادیر شعاع ستاره وسیاره در سیستم‌های $OGLE-TR-113$ و $WASP-3$ مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله نهایی با تحلیل گرفت دوم در ناحیه فرو سرخ دمای سیاره را برای سیستم های مورد مطالعه را بدست آورده‌ایم. محاسبه خطای پارامترهای محاسبه شده و مقایسه نتایج با کارهای پیشین بخش آخر این پایان‌نامه می‌باشد.

فهرست مطالب

مقدمه ۱

فصل اول: بررسی منابع و پیشینه‌ی پژوهش

۱-۱ تاریخچه رصد سیارات فرا خورشیدی ۵
۱-۲ سیاره فراخورشیدی مطابق تعریف IUA ۵
۱-۳روشهای رصد سیارات فرا خورشیدی ۶
۱-۳-۱ روش سرعت شعاعی یا روش دوپلر ۶
۱-۱-۳-۱ اطلاعاتی که از تحلیل منحنی سرعت شعاعی بدست می‌آیند ۷
۱-۲-۱-۳-۱ معایب و مزایای استفاده از روش سرعت شعاعی در رصد سیارات ۱۰
۱-۳-۲ روش گذر ۱۱
۱-۲-۳-۱ رصد سیارات به روش گذر ۱۱
۱-۲-۲-۳-۱ تعیین پارامترهای فیزیکی سیستم منظومه ای به کمک تحلیل منحنی نوری..... ۱۲
۱-۲-۳-۲-۳-۱ مزایا و معایب رصد سیارات به روش گذر ۱۳
۱-۳-۳ همگرایی ریز گرانشی ۱۳
۱-۳-۳-۱ چگونگی رصد سیارات به روش همگرایی ریز گرانشی ۱۳
۱-۳-۳-۲ مزایا و معایب روش همگرایی ریز گرانشی ۱۵
۱-۳-۳-۳ پروژه‌های فعال در رصد سیارات به روش همگرایی ریز گرانشی ۱۵
۱-۳-۴ روش زمان سنجی ستارگان تپنده ۱۶
۱-۳-۵ روش تصویر برداری ۱۷
۱-۴ بررسی ویژگی-های فیزیکی سیارات و سیستم های منظومه ای ۱۸
۱-۴-۱ توزیع آماری دوره مداری سیارات فرا خورشیدی ۱۹
۱-۴-۲ توزیع آماری خروج از مرکز مدارسیارات فرا خورشیدی ۲۲
۱-۴-۳ توزیع آماری جرم سیارات فرا خورشیدی ۲۴
۱-۴-۴ توزیع آماری جرم و شعاع در سیارات فرا خورشیدی ۲۶
۱-۴-۵ ارتباط میان فراوانی آهن در ستاره و سیارات سیستم ۲۸
۱-۴-۶ همبستگی میان جرم ستارگان میزبان و جرم سیارات ۲۹

فصل دوم: مبانی و روش‌ها

۲-۱ دوتایی طیفی ۳۳
۲-۲ تعریف زاویه میل ۳۳
۲-۳محاسبه جرم با استفاده از تحلیل منحنی سرعت شعاعی ۳۴
۲-۴ دوتایی گرفتی ۳۵
۲-۵ محاسبه شعاع با تحلیل منحنی نوری فرضی ۳۵
۲-۶ تأثیر پارامترهای مختلف بر منحنی نوری ۳۷
۲-۶-۱ اثر زاویه‌ی میل ۳۷
۲-۶-۲ اثر تاریکی لبه ۳۷
۲-۶-۳ اثر تاریکی گرانشی ۴۱
۲-۶-۴ اثر بازتابش ۴۳
۲-۷ روش تحلیل منحنی نوری در محدوده‌ی زمان ۴۶
۲-۸ روش آنالیز فوریه در تحلیل منحنی نوری ۵۰
۲-۹ روش تکرار برای تعیین پارامترهای فیزیکی از تحلیل منحنی نوری ۵۸
۲-۱۰ آنالیز منحنی نوری سیستمهای دوتایی مجزا به کمک برنامه‌ی JKTEBOP ۵۸

فصل سوم: نتایج و پیشنهادات

۳-۱ شبیه‌سازی منحنی نوری سیستم سیاره-ستاره ۶۲
۳-۲ شبیه‌سازی اولیه گذر سیاره از مقابل ستاره ۶۲
۳-۲-۱ محاسبه ی کاهش روشنایی در مرحله اول ۶۳
۳-۲-۲ محاسبه‌ی کاهش روشنایی در مرحله‌ی دوم ۶۳
۳-۳ بررسی تغییرات ناشی از زاویه میل در منحنی نوری ۶۶
۳-۴ بررسی اثر لبه تاریکی در منحنی نوری سیستم سیاره-ستاره ۶۹
۳-۵ بررسی وابستگی اثر تاریکی لبه به طول موج ۷۱

۳-۶ بررسی اثر تاریکی گرانشی در منحنی نوری ۷۱
۳-۷ بررسی اثر بازتابش نور در منحنی نوری ۷۵
۳-۸ استفاده از روش آنالیز فوریه برای تعیین پارامتر های سیستم سیاره-ستاره ۸۰
۳-۸-۱ گام اول: استخراج داده از منحنی نوری ۸۳
۳-۸-۲ گام دوم: رسم A_{2m} ها ۸۴
۳-۸-۳ گام سوم: محاسبه مساحت A_{2m} ها ۸۴
۳-۸-۳-۱ روش I: استفاده از دستور محاسبه مساحت چندضلعی ها در MATLAB..... ۸۴
۳-۸-۳-۲ روشII : برازش تابع بر داده های منحنی نوری ۸۵
۳-۹ احتساب لبه تاریکی در آنالیز فوریه منحنی نوری ۹۲
۳-۱۰ احتساب بازتابش نور در پارامترها در روش آنالیز فوریه منحنی نوری..... ۹۸
۳-۱۱ محاسبه خطا ۱۰۷
۳-۱۲ تعیین پارامترهای سیستم سیاره-ستاره با استفاده از JKTEBOP ۱۰۸
۳-۱۳ محاسبه دمای سیاره به کمک گرفت دوم ۱۰۹
نتایج ۱۱۳
پیشنهادات ۱۱۴
مراجع ۱۱۶

فهرست شکلها

شکل ۱-۱: حرکت سیاره وستاره میزبان حول مرکز جرم مشترکشان ۶

شکل ۲-۱: منحنی تغیرات سرعت شعاعی بر حسب زمان ۷

شکل ۳-۱: اثر روزیتر – مک لافلین ۹

شکل ۴-۱: زاویه λ زاویه بین اسپین چرخش ستاره و خط عمود بر مدار حرکت سیاره ۹

شکل ۵-۱: منحنی نوری عبور سیاره ار مقابل ستاره ۱۱

شکل ۶-۱: اثر همگرایی ریز گرانشی و منحنی تغییرات نوری ستاره منبع بر حسب زمان ۱۴

شکل ۷-۱ : ارتباط دوره مداری و تعداد سیارات ۱۹

شکل ۸-۱: توزیع آماری خروج از مرکز سیارات بر اساس دوره مداریی و جرم ۲۲

شکل ۹-۱: توزیع آماری سیارات رصد شده به روش سرعت شعاعی بر اساس جرم ۲۵

شکل ۱۰-۱: توزیع جرمی سیارات بر اساس شعاع ۲۷

شکل ۱۱-۱: فراوانی سیارات بر اساس فراوانی آهن در ستاره ۲۸

شکل ۱۲-۱: فراوانی رصد بر اساس جرم ۳۰

شکل ۱-۲: زوایه میل ۳۴

شکل ۲-۲: منحنی نوری که در اثر عبور سیاره فرضی از مقابل ستاره میزبانش ایجاد می شود ۳۶

شکل ۳-۲: از دید ناظر عمق نوری در هم جای سطح یک ستاره یکسان نیست ۳۸

شکل ۴-۲: اثر گرانش بر تغییر شکل ستاره ۴۲

شکل ۵-۲: تابش نور از یک جزء سیستم دوتایی بر جزء دیگر ۴۴

شکل ۶-۲: نیمرخ گرفت از لحظه $(\theta = \theta')$ تا $(\theta = 0)$ ۵۱

شکل ۱-۳: همپوشانی دو دایره با شعاع‌های متفاوت ۶۳

شکل ۲-۳: گذر سیاره از مقابل ستاره با در نظر گرفتن زاویه میل ۶۷

شکل ۳-۳: گذر سیاره از مقابل ستاره با در نظر گرفتن اثر تاریکی لبه ۶۹

شکل ۴-۳: منحنی نوری شبیه سازی شده سیستم خورشید–مشتری در ساده ترین حالت ۷۶

شکل ۵-۳: منحنی نوری شبیه سازی شده سیستم خورشید–مشتری با در نظر گرفتن زاویه میل ۷۶

شکل ۶-۳: شبیه سازی سیستم خورشید–مشتری با در نظر گرفتن اثر تاریکی لبه در زاویه میل ۷۷

شکل ۳-۷: شبیه سازی منحنی نوری با در نظر گرفتن اثر تاریکی لبه با زاویه میل ۷۷
شکل ۳-۸ : شبیه سازی منحنی نوری در طول موج های مختلف$(i = 90°)$ ۷۸
شکل ۳-۹ : شبیه سازی منحنی نوری در طول موج های مختلف$(i = 60°)$ ۷۸
شکل ۳-۱۰: شبیه سازی سیستم مشتری –خورشید با در نظر گرفتن اثر تاریکی گرانشی ۷۹
شکل ۳-۱۱: شبیه سازی سیستم مشتری –خورشید با در نظر گرفتن اثر بازتابش ۷۹
شکل ۳-۱۲: منحنی نوری سیستم OGLE_TR_113 ..... ۸۳
شکل ۳-۱۳: منحنی نوریOGLE_TR_113 بر حسب $\sin^2\theta$ ۸۶
شکل ۳-۱۴: منحنی نوریOGLE_TR_113 بر حسب $\sin^4\theta$ ۸۷
شکل ۳-۱۵: منحنی نوریOGLE_TR_113 بر حسب $\sin^6\theta$ ۸۷
شکل ۳-۱۶: تابع برازش شده بر منحنی نوریOGLE_TR_113 بر حسب $\sin^2\theta$ ۸۸
شکل ۳-۱۷: تابع برازش شده بر منحنی نوریOGLE_TR_113 بر حسب $\sin^4\theta$ ۸۹
شکل ۳-۱۸: تابع برازش شده بر منحنی نوریOGLE_TR_113 بر حسب $\sin^6\theta$ ۹۰
شکل ۳-۱۹: منحنی نوری ستاره دوتاییIY Aurigae ۹۹
شکل ۳-۲۰: چگونگی تأثیر بازتابش بر منحنی نوری در آنالیز فوریه ۱۰۱
شکل ۳-۲۱: منحنی نوری گرفت دوم در سیستم OGLE_TR_113.....۱۰۹
شکل ۳-۲۲: منحنی نوری گرفت دوم در سیستم $WASP-3$.....۱۱۰

مقدمه:

استفاده از شیوه های مختلف رصد و نیز تجهیز و افزایش تعداد تلسکوپ های رصد گر سیارات فراخورشیدی، علاوه بر افزایش چشم‌گیر کشف این سیارات موجب انجام رصد های بسیار دقیق‌تر نیز شده است. مبنای فیزیکی روشهای اصلی رصد سیارات فرا خورشیدی تقریباً همان روش‌هایی است که در کشف و رصد ستارگان دوتایی بکار برده می‌شود. بنابراین روشهایی که در تحلیل نتایج رصدی در سیستم‌های دوتایی بکار می‌رود غالباً در مورد سیستم سیارات نیز قابل استفاده است. تحلیل فیزیکی داده-های رصدی منجر به تعیین پارامترهای فیزیکی سیستم می‌شود. تعیین دقیق پارامترهای فیزیکی سیستم-های منظومه‌ای از دو جهت حائز اهمیت است. اول آنکه محاسبه دقیق پارامترهای فیزیکی یک سیستم به همراه مقایسه و بررسی این پارامترها در سیستم–های مختلف می‌تواند منجر به ارائه راه حلهای بهتر درباره مشکلاتی شود که نظریه‌های شکل گیری و تحول سیستم‌های منظومه‌ای با آن درگیرند و دیگر آنکه تعیین دقیق این پارامترها تأثیر مهمی در یافتن سیاراتی خواهد داشت که بیشترین شباهت فیزیکی را به زمین دارند و امکان یافتن حیات فرا زمینی در آنها بیشتر است.

بیشترین اطلاعات فیزیکی (و در مورد بعضی پارامترها دقیق‌ترین مقادیر)را در مورد سیستمی می‌توان بدست آورد که منحنی نوری آن سیستم را در اختیار داریم. منحنی نوری را _چنانکه بعداً نیز مفصلاً توضیح داده خواهد شد _ در مورد سیستم هایی می‌توان بدست آورد که عبور سیاره از مقابل ستاره میزبانش در امتداد دید ناظر باشد و نیز فاصله ناظر از سیستم _ با توجه به توان تفکیک تلسکوپ_ به اندازه‌ای باشد که بتواند گرفت ناشی از عبور سیاره از مقابل ستاره را رصد کند. با تحلیل گرفت اول و

دوم یک سیستم می توان شعاع ستاره میزبان، شعاع سیاره، زاویه میل ، دما خروج از مرکز را تعیین کرد. همچنین با بررسی منحنی های نوری یک سیستم که در زمان-های مختلف بدست آمده‌اند می‌توان اطلاعاتی را در مورد آن سیستم و یا قمر سیاره بدست آورد.تعیین جرم دقیق ستاره میزبان وسیاره نیاز به رصد طیف سنجی دارد.

در فصل اول این رساله روشهای مختلف رصد سیارات فرا خورشیدی به همراه معایب و مزایای هر کدام از این روشها و نیز پروژه‌های رصدی فعال در آن زمینه معرفی شده است. علاوه بر این بررسی آماری سیستم های رصد شده از لحاظ خصوصیات فیزیکی برای شناخت شباهت و تفاوت منظومه ها و نیز نحوه شکل گیری و تحول آنها ارائه شده است.

در فصل دوم روش‌هایی که برای تحلیل منحنی نوری بکار برده می‌شود توضیح داده شده‌اند همچنین عواملی که می‌تواند بر شکل منحنی نوری تأثیرگذار باشد مورد بررسی قرار گرفته‌اند

در فصل سوم،، ابتدا منحنی نوری یک سیستم سیاره- ستاره شبیه سازی شده و سپس میزان تأثیر هر یک از عوامل فیزیکی مؤثر بر منحنی نوری در مورد این سیستم ها به تفکیک نشان داده شده‌است. در مرحله بعد محاسبه پارامترهای فیزیکی شامل شعاع ستاره، شعاع سیاره و زاویه میل با بکار گیری روش آنالیز فوریه در سیستم ستاره-سیاره مورد بررسی قرار گرفته و این پارامترها برای دو سیستم $OGLE-TR-113$ و $WASP-3$محاسبه شده است. این محاسبات ابتدا بدون در نظر گرفتن اثر تاریکی لبه و در مرحله بعد با در نظر گرفتن این اثر انجام شده‌است.در مرحله سوم با وارد کردن روابط مربوط به بازتابش در محاسبات آنالیز فوریه میزان تأثیر این پدیده در تعیین دقیق شعاع ستاره وسیاره در مشتری‌گون‌های داغ

مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت با کمک گرفت دوم در ناحیه فرو سرخ دمای سیاره را برای سیستم های مورد مطالعه بدست آورده‌ایم.

در ضمن نشان واره[۱] استفاده شده در بالای صفحات متعلق به مأموریت فضایی $COROT$ [۲] است که توسط سازمان فضایی فرانسه با همکاری سازمان فضایی اروپا، به منظور کشف سیارات به روش گذر و رصد منحنی نوری سیارات ثبت شده از سال دسامبر ۲۰۰۶ در جو قرار گرفته و تا کنون ۱۷ سیاره را کشف کرده است.

[1] logo
[2] **CO**nvection **RO**tation and planetary **T**ransits

فصل اول

بررسی منابع و پیشینه پژوهش

۱-۱ تاریخچه رصد سیارات فرا خورشیدی[1]:

ایده‌ی وجود سیارات فرا خورشیدی به اواسط قرن نوزدهم بر می گردد ولی زمان نسبتاً طولانی سپری شد تا اولین سیاره‌ی فرا خورشیدی کشف شود. علت این تأخیر فاصله زیاد آنها از زمین و نیز اندازه‌ی طبیعی سیارات بود که ، این رصدها را_ مخصوصا به طور مستقیم _تقریبا غیر ممکن می‌ساخت. البته با ابداع روش های گوناگون برای رصدهای غیر مستقیم، امکان کشف این سیارات ساده‌تر گردید. اولین سیاره‌ی فرا خورشیدی که به روش اندازه گیری سرعت شعاعی در ۱۹۹۵ کشف شد، یک غول گازی بود که در یک مدار با دوره‌ای برابر با چهار روز حول ستاره‌ای با نوع طیفی G در صورت فلکی فرس اعظم (51pegasi) می‌گردید. روند کشف سیارات فرا خورشیدی اکنون با سرعت بیشتری ادامه دارد بطوریکه تا آگوست ۲۰۱۰ ، دقیقا ۴۹۰ سیاره ی فرا خورشیدی کشف شده اند[1].

۱-۲ سیاره فراخورشیدی مطابق تعریف (IUA) [2]:

۱. هر شیء با جرم ثابت و کمتر از جرم لازم برای آغاز واکنش های هیدروژن سوز (این جرم در حدود ۱۳ برابر جرم مشتری است) که در حال گردش به دور ستاره یا بقایای یک ستاره باشد، یک سیاره ی فرا خورشیدی است. حداقل چگالی برای آنکه یک شیء فرا خورشیدی سیاره تلقی شود باید مشابه سیاراتی باشد که در سیستم خورشیدی ما وجود دارند.

۲. هر شیء با جرمی بالاتر از جرم لازم برای آغاز واکنش های هیدروژن سوز، که به هر دلیلی این واکنش در آن آغاز نشده و جرمی ثابت داشته باشد، کوتوله قهوه ای[3] است.

---

[1] Extra-solar planet
[2] International astronomical union
[3] Brown dwarf

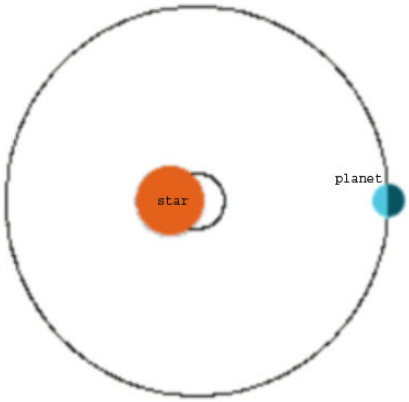
۳. اشیاء سرگردان در خوشه های ستاره ای جوان با جرمی کمتر از جرم لازم برای شروع واکنش های هیدروژن سوز، سیاره تلقی نمی شوند، بلکه خرده کوتوله های قهوه ای‌اند [2].

تنها اجرامی که پس از رصد، ویژگی‌های فوق را داشته باشند به عنوان سیاره فرا خورشیدی ثبت می-شوند.

۳-۱روش‌های رصد سیارات فرا خورشیدی:

۱-۳-۱ روش سرعت شعاعی یا روش دوپلر[1]:

اگر ستاره ای دارای سیاره باشد، اثر گرانشی سیاره باعث می شود که ستاره از دید ناظر بر روی یک مدار دایروی یا بیضوی کوچک حرکت کند (شکل ۱-۱). ستاره در حین حرکت از ناظر زمینی دور یا به او نزدیک خواهد شد و بنابراین خطوط طیف ستاره به طرف ناحیه قرمز(***red shift***) یا به طرف ناحیه آبی(***blue shift***) جابجا خواهد شد.



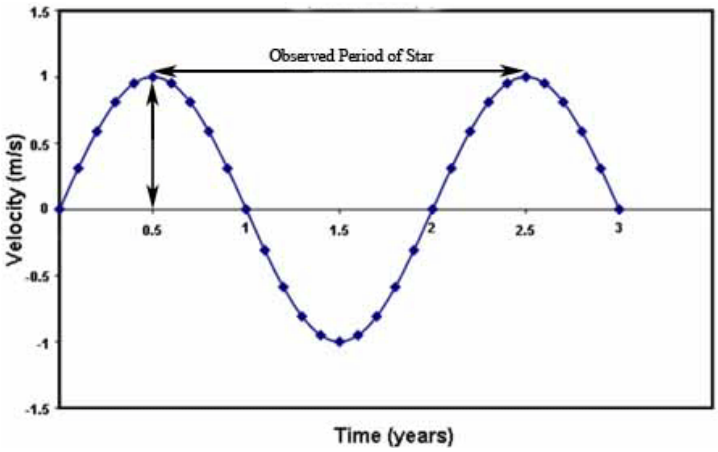
شکل ۱-۱: حرکت سیاره وستاره میزبان حول مرکز جرم مشترکشان [3]

[1] Radial velocity (Doppler method)

با اندازه گیری مقدار جابجایی و محاسبه سرعت شعاعی از رابطه دوپلر (۱-۱)در یک دوره ی کامل می توان سرعت شعاعی را به دست آورد. (شکل ۲-۱)

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+v/c}{1-v/c}} - 1 \qquad (۱.۱)$$

با رسم تغییرات سرعت شعاعی بر حسب زمان، منحنی سرعت شعاعی بدست می‌آید. با تحلیل این منحنی می توان تعدادی از پارامتر های فیزیکی سیستم ستاره –سیاره را به دست آورد .



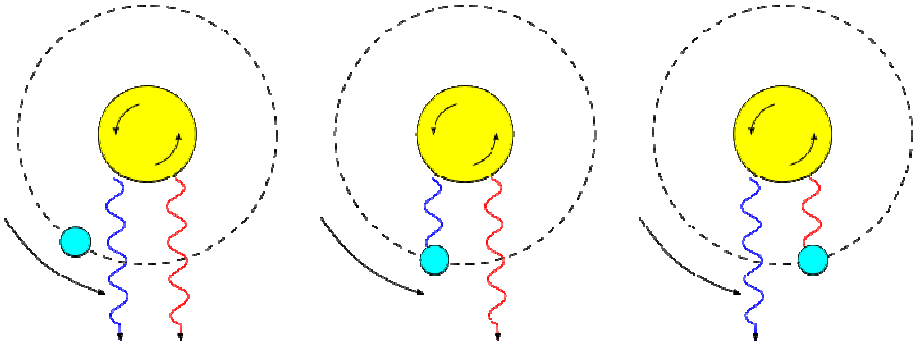
شکل ۲-۱: منحنی تغیرات سرعت شعاعی بر حسب زمان [3]

۱-۱-۳-۱ اطلاعاتی که از تحلیل منحنی سرعت شعاعی بدست می‌آیند عبارتند از:

- **دوره مداری**: با استفاده از منحنی سرعت شعاعی ستاره می توان دوره مداریی گردش سیاره حول ستاره را به دست آورد. همانطور که در شکل (۲-۱) نیز پیداست فاصله‌ها زمان بین دو سرعت شعاعی یکسان زمان یک چرخش کامل یا دوره مداری حرکت سیاره حول ستاره را نشان می‌دهد.

- **خروج از مرکز مدار**[1]: با بررسی دقیق منحنی سرعت شعاعی می‌توان مقدار خروج از مرکز مدار را نیز تعیین کرد. اگر مدار حرکت سیاره حول ستاره دایروی نباشد منحنی سرعت شعاعی از حالت سینوسی کامل خارج می شود و زمان‌های طی شده در دو نیمه‌ی مدار یکسان نخواهد بود. با اندازه گیری دقیق این اختلاف می‌توان مقدار خروج از مرکز مدار را محاسبه کرد. البته محاسبه‌ی دقیق خروج از مرکز به چندین بار رصد سرعت شعاعی سیستم منظومه‌ی مورد نظر نیاز دارد.
- **حداقل جرم ستاره و سیاره:** به دلیل زاویه میل ستاره (زاویه ای که خط عمود بر صفحه‌ی مدار سیاره با امتداد دید ناظر می‌سازد) سرعتی که با استفاده از جابجایی خطوط طیفی بدست می‌آید سرعت شعاعی ستاره(سرعت ستاره در امتداد دید ناظر است) است که بسته به مقدار زاویه میل با مقدار واقعی سرعت حرکت ستاره حول مرکز جرم مشترک با سیاره متفاوت است. جرم دقیق ستاره و سیاره را بدلیل نا معلوم بودن مقدار زاویه میل نمی‌توان بدست آورد.آنچه به کمک سرعت شعاعی می توان به دست آورد حداقل جرم ستاره و سیاره است.
- **تعیین هم ترازی اسپین مداری**[2]: تعیین هم ترازی اسپین مداری به کمک اثر روزیتر– مکلافلین[3] یا اثر RM امکان پذیر است. اثر RM ناشی از حرکت چرخشی ستاره حول محور خودش است . در یک ستاره در حال دوران، وقتی نیمکره اول به طرف ناظر حرکت می‌کند نیمکره دوم از ناظر دور خواهد شد و بنابراین نور گسیلی از دو نیمکره به ترتیب به طرف طول موج‌های آبی و قرمز جابجا می‌شود.

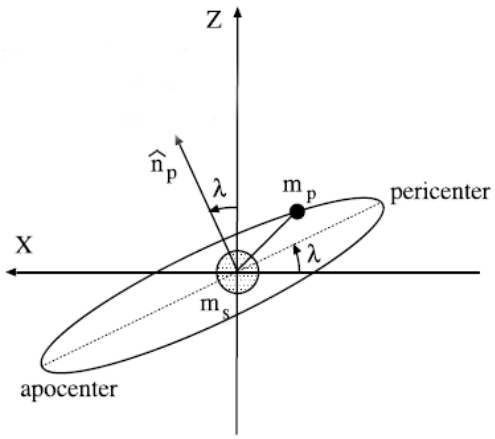
[1] Eccentricity
[2] Spin-orbit Alignment
[3] Rossiter-Maclaughlin



شکل ۳-۱: اثر روزیتر – مک لافلین [5]

وقتی با استفاده از روش سرعت شعاعی، سیاره ای در حال گردش حول ستاره ای چرخان را بررسی می‌کنیم، عبور سیاره از مقابل ستاره می‌تواند باعث ایجاد گرفت_ در پهن شدگی دوپلری ناشی از چرخش ستاره حول محور خود_ در طیف دریافتی از ستاره میزبان شود.(۳-۱)

با توجه به مقدار و زمان این گرفتگی در پهن شدگی خطوط دوپلری ناشی از اثر RM می توان زاویه اسپین مداری (λ) _که زاویه خط عمود بر مدار گردش سیاره با محور چرخش ستاره میزبان است_ را بدست آورد [5]،[6]. (شکل ۴-۱)



شکل ۴-۱: زاویه **λ** زاویه بین اسپین چرخش ستاره و خط عمود بر مدار حرکت سیاره [7]

برای یک سیاره از نوع مشتری داغ[1] در حال گردش به دور یک ستاره از نوع طیفی G این اثر از مرتبه دهها متر بر ثانیه است. بنابراین این اثر می تواند برای مطالعه ویژگی های اکثر سیارات فرا خورشیدی بکار رود. نتیجه اصلی در اندازه گیری اثر RM برای سیاراتی که زاویه اسپین–مداری آنها صفر یا نزدیک به صفر است متفاوت می‌باشند. در تأیید نظریه های شکل گیری و تحول سیستم های منظومه ای این نتیجه بسیار مهم است. زیرا این نظریه‌ها سیارات و ستاره میزبانشان را حاصل از رمبش یک ابر مولکولی فرض می کنند و بنابر این تکانه زاویه ای اصلی آ نها یکسان است و تحولات بعدی نمی تواند مدار سیارات را چندان از حالت اولیه خارج کند.

تنها استثنای ممکن در زاویه اسپین مداری مربوط به سیاره $XO-3b\ (\lambda = 37.7^\circ + 3.7^\circ)$ است . این سیاره از لحاظ خصوصیات دیگر نیز سیاره جالبی است چرا که با وجود دوره مداری کوتاه دارای خروج از مرکز غیر صفر دارد و علاوه بر این سیاره ای سنگین است $(P = 3.2\ days\ ,\ M = 12.5\ M_{jup})$. احتمال می رود این سیاره متعلق به دسته نادری از سیارات با شکل گیری و تحول بسیار متفاوت با بقیه سیارات باشد . تعداد قابل توجه این سیارات متفاوت نشان می دهد که اثرات فیزیکی متفاوتی باید در مطالعه شکل گیری و تحول سیاراتی که متفاوت از دیگر سیاراتند ، لحاظ شود[8] .

۲-۱-۳-۱ معایب و مزایای استفاده از روش سرعت شعاعی در رصد سیارات

این روش تا کنون با رصد ۴۹۵ سیاره به بهترین روش کاربردی در شکار سیارات تبدیل شده است. تأثیر اختلال های ممکن در این روش بسیار اندک است و تنها عامل مؤثر در آن نسبت سیگنال به نوفه است(نسبت سیگنال به نوفه میزان تخریب سیگنال های دریافتی را در اثر اختلال نشان می دهد). این

[1] Hot Jupiter