دانشکده فیزیک

گروه نظری و اخترفیزیک

پایاننامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

گرایش اخترفیزیک

تحریک نوسانات ۵ دقیقه‌ای در سیخک‌های خورشیدی با اعمال شار پایا

Excitation of 5-min Oscillations in Solar spicules by Applying Steady Flow

استاد راهنما

دکتر زهرا فاضل مراغه

استاد مشاور

دکتر حسین عبادی

پژوهشگر

سارا علاف رزاقی

به نام آنکه...

انسان را آفرید...

و به او قدرت داد...

تا بیاندیشد،

تدبیر کند و...

آفرینش را تحسین کند

تقدیم به...

پدر و مادرمهربانم،

خواهرم، تکیه‌گاه همه عمرم...

همسرش وماحصل عشقشان!

و تقدیم به مادربزرگم...

مخلوق بی‌همتای پروردگار!

سپاس

با تشکر فراوان از استاد بزرگوارم، خانم دکتر فاضل نمونه‌ی بارز یک بانوی ایرانی موفق در جامعه که در طول این مدت بی‌نظمی‌های مرا با صبر و بردباری، تدبیر نموده و با دانش و راهنمایی‌های خود حرکت مرا در این مسیر هموار نمودند. و با سپاس ویژه از استاد مشاورم دکتر عبادی که علاقه‌ی قلبی نه تنها من بلکه همه دانشجویان به ایشان به خاطر سادگی و احساسات پاک قلبی‌شان، وصف‌ناپذیر است. و با قدردانی از استاد بزرگوار، مایه فخر و مباهات آذربایجان و سرزمینمان ایران، پروفسور عجبشیرزاده که داوری این پایاننامه را بر عهده دارند. و با تشکر ویژه از خانواده خوبم که همواره پشتیبانم بودند و در کنارم. و بدون حمایت و حضور آنان رسیدن به این مرحله از زندگیم غیرممکن بود.

نام خانوادگی: علاف رزاقی **نام:** سارا

عنوان پایاننامه: تحریک نوسانات ۵ دقیقه‌ای در سیخکهای خورشیدی با اعمال شار پایا

استاد راهنما: دکتر زهرا فاضل مراغه

استاد مشاور: دکتر حسین عبادی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** فیزیک **گرایش:** اختر فیزیک

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فیزیک

تاریخ فارغ التحصیلی: آبان ماه سال ۹۳ **تعداد صفحات:** ۱۱۶

کلیدواژه: خورشید، نوسانات ۵ دقیقه‌ای، پالسهای فوتوسفری، سیخک‌های خورشیدی

چکیده : سیخک‌های خورشیدی ساختارهای جت مانندی هستند که در کروموسفر و در لبه خورشید رصد می شوند .برای تحریک نوسانات عرضی در سیخک‌ها مکانیزم های مختلفی ارائه شده که از آن جمله می توان به پالس های فوتوسفری ناشی از نوسانات گرانولی، باز اتصالی خطوط میدان و اثرات غیرخطی اشاره کرد. در فوتوسفر پویا و دینامیک، دو نوع محرک وجود دارد: ۱- محرک نوسانی مانند p-مدها ۲-محرک ضربه ای مانند گرانول ها یا رخدادهای ناگهانی ناشی از اتصال مجدد مغناطیسی. هر دو نوع از محرکها می توانند عامل پدیده های دینامیکی مشاهده شده در نواحی اتمسفری بالاتر باشند. در مطالعه حاضر سعی بر آن است که با استفاده از پالس های فوتوسفری و با اعمال شار پایا، به تحریک این امواج که بیشترین نوسانات مشاهده شده در سیخکها هستند بپردازیم. برای مطالعه امواج ۵ دقیقه ای در سیخک‌ها از معادلات امواج MHD استفاده می‌شود. این معادلات توسط کد TMC بصورت عددی حل می‌شوند. نتایج حاصله بصورت نمودارهای انرژی، سرعت و میدان مغناطیسی اختلالی معرفی می‌شود. دوره‌ی تناوب و انرژی نوسانات ۵ دقیقه‌ای از روی این نمودارها به دست می‌آیند.

فهرست مطالب

مقدمه ۱۲

فصل اول ۱۲

۱-۱ خورشید ۱۳

۱-۱-۱ ساختار داخلی خورشید ۱٦

۱-۲ ساختار سطحی و جو خورشید ۱٦

۱-۲-۱ فوتوسفر ۱۷

۱-۲-۲ کرومسفر ۱۸

۱-۲-۳ ناحیه انتقالی یا گذر ۱۸

۱-۲-٤ کرونا ۱۹

۱-۳ گرانولهای خورشیدی ۲۰

۱-۵ بررسی مسئلهی گرمایش تاج خورشیدی ۲۱

۱-۵-۱ نقش میدان مغناطیسی و امواج آلفون در گرمایش تاج ۲۲

۱-۵-۲ اتصال مجدد مغناطیسی ۲۳

۱-۵-۳ جذب تشدیدی ۲٤

۱-۵-٤ ترکیب فازی ۲٤

۱-٦ سیخکهای خورشیدی ۲٤

۱-٦-۱ انواع سیخکها ۲۷

۱-٦-۱-۱ سیخکهای نوع ۱ ..... ۲۷

۱-٦-۱-۲ سیخکهای نوع ۲ ..... ۲۸

۱-٦-۲ ویژگی های فیزیکی و ظاهری سیخکها ۲۹

۱-٦-۲-۱ دما و چگالی ۲۹
۱-٦-۲-۲ خمیدگی ۳۰
۱-٦-۲-۳ جهت گیری سیخک‌ها ۳۰
۱-٦-۲-٤ سرعت سیخک‌ها ۳۱
۱-٦-۲-٥ قطر سیخک‌ها ۳۳
۱-٦-۲-٦ طول عمر سیخک‌ها ۳۳
۱-٦-۲-۷ طول موج رصدی سیخک‌ها ۳٤
۱-٦-۲-۸ تعداد سیخک‌ها ۳٤
۱-٦-۲-۹ ابعاد سیخک‌ها ۳٥
۱-٦-۲-۱۰ ارتفاع سیخک‌ها ۳۷
۱-٦-۲-۱۱ عرض سیخک‌ها ۳۸
۱-۷ بررسی نوسانات سیخک‌ها ٤۰
۱-۷-۱ ماهیت نوسانات عرضی در سیخک‌ها ٤٤
۱-۷-۱-۱ کنیک مدها ٤٤
۱-۷-۱-۲ امواج آلفون ٤٥
۱-۸ پارامتر β در جو خورشید ٤٦
۱-۹ انواع نوسانات خورشیدی ٤۷
۱-۱۰ بررسی نوسانات ٥ دقیقه ای در کرونا ٤۹
۱-۱۱ تاریخچه مطالعات حول نوسانات ٥ دقیقه ای ٥۰
۱-۱۱-۱ نحوه کانال زدن نوسانات ٥ دقیقه ای به کرونا ٥۰
۱-۱۱-۲ بررسی مدل شوکهای بازگشتی توسط هالوگ ٥۳
۱-۱۱-۳ بررسی زاکاراشویلی و همکارانش حول نوسانات ٥ دقیقه ای ٥٦

فصل دوم

۲-۱ جایگاه شبیه سازی در پژوهش های اختر فیزیکی ۵۹

۲-۲ معادلات MHD ٦۱

۲-۳ حل دستگاه معادلات MHD ٦۷

۲-٤ نگاهی دقیق تر به معادله القا ٦۸

۲-۵ جمع بندی معادلات MHD ۷۰

۲-٦ MHD آرمانی ۷۲

۲-۷ خطی سازی معادلات MHD ۷۵

۲-۸ کد TMC ۸۱

فصل سوم

۳-۱ مروری بر نحوه تشکیل نوسانات و معرفی مدل ۸۵

۳-۲ معادلات توصیف کننده‌ی مدل ۸۷

۳-۳ نتایج بدست آمده با اعمال شرایط در کد TMC ۹۸

۳-٤ بحث پیرامون نتایج بدست آمده ۱۰۹

۳-۵ فهرست منابع ۱۱۳

فهرست اشکال

فصل اول: بررسی منابع

شکل (۱): تصویری از خورشید و بخش‌های تشکیل دهنده‌ی آن ۱۵

شکل (۲): نمودار تغییرات دما بر حسب ارتفاع در ناحیه تاج خورشید ۱۹

شکل (۳): تصویری از گرانول‌های سطح خورشید، رصد خانه ملی نجوم ۲۰

شکل(٤): تصویری از ماتل‌های رصد شده توسط Hinode/SIT ۲۱

شکل (۵): تصویری از سیخک‌های لبه خورشید که توسط تلسکوپ نوری گرفته شده..... ۲۵

شکل (٦): تصویری نزدیک از سیخکهای لبه خورشید گرفته شده توسط SOT.....۲۷

شکل(۷): تصویری از سیخک‌های نوع ۱و ۲.....۲۸

شکل(۸): یک طرح شماتیکی از نحوه بوجود آمدن امواجMHD و سیخک‌های نوع ۲ از طریق EBS.....۲۹

شکل(۹): تصویر گرفته شده از سیخک‌ها در نواحی فعال خورشید توسط SOT..... ۳۱

شکل(۱۰): بررسی افزایش تعداد سیخکها تا ارتفاع ۷۰۰۰ کیلومتری و کاهش تعداد از آن ارتفاع به بعد.....۳٦

شکل(۱۱): شماتیکی از ابعاد سیخکها.....۳۷

شکل(۱۲): شماتیکی از شگردFWHM.....۳۸

شکل(۱۳):مسیر حرکت ۹ سیخک مطالعه شده.....٤۱

شکل(۱٤): تصاویری از نحوه حرکت مدهای کینک و آلفون چرخشی در تیوبهای شار.....٤٥

شکل(۱٥): طیف نوسانات خورشیدی که توسط GOLF در سال ۱۹۹٦ گرفته شده.....٤۹

شکل(۱٦): سرعت پلاسمای شبیه‌سازی شده در طول تیوب شار خمیده با زاویه ٤٥ درجه.....٥۱

شکل(۱۷): تغییرات شدت نوسانات حلقه‌های کرونایی.....٥۲

شکل(۱۸): تغییرات سطح مقطع تیوبهای شار مغناطیسی نسبت به ارتفاع.....٥٤

شکل(۱۹): تغییرات ارتفاع ناحیه گذر با زمان در مدل شوک بازگشتی با زمان.....٥٥

شکل(۲۰): نمودار سرعت بر حسب ارتفاع در زمان t=250s و $A_{\upsilon} = 1km/s$ ٥۷

فصل دوم:مبانی و روش‌ها

شکل(۱): شبیه‌سازی‌های گوناگون در اخترفیزیک امروز.....٦۱

شکل(۲): نمایشی از زفتار پلاسمای آرمانی در اثر هم‌روی.....۷٥

شکل(۳): کشیده شدن خطوط میدان با حرکت پلاسما و آغاز آشفتگی.....۸۱

فصل سوم: بررسی نتایج

شکل(۱): نمودار تغییرات انرژی جنبشی نوسانات ۵ دقیقه‌ای به انرژی کل.....۹۹

شکل(۲): نمودار تغییرات انرژی مغناطیسی نوسانات ۵ دقیقه‌ای نرمالیزه شده بر حسب انرژی مغناطیسی در t=0.....۱۰۰

شکل(۳): نمودار نسبت تغییرات انرژی کل برای نوسانات ۵ دقیقه‌ای.....۱۰۱

شکل(٤): نمودار تغییرات میدان مغناطیسی اختلالی در مکان (Z=17) برای نوسانات ۵ دقیقه-ای.....۱۰۲

شکل(۵): نمودار تغییرات میدان مغناطیسی اختلالی در مکان (Z=10) برای نوسانات ۵ دقیقه-ای.....۱۰۳

شکل(٦): نمودار میدان مغناطیسی اختلالی بر حسب زمان بدون بعد در مکان مشخص برای نوسانات ۵ دقیقه‌ای.....۱۰٤

شکل(۷): تغییرات دوره تناوب نوسانات بر حسب دامنه موج ارسالی با مکان اولیه 0.5 مگامتر.....۱۰۵

شکل(۸): تغییرات سرعت اختلالی در زمان t=20وt=0 .....۱۰٦

شکل(۹): نمودار دو بعدی تغییرات سرعت نسبت به زمان برای نوسانات ۵ دقیقه-ای.....۱۰۷

شکل(۱۰): تغییرات سرعت در(X=0,Y=2.5) و $(X_0 = 0, Y_0 = 0.5)$، برای حالتی که $A_v = 5Km/s$ ۱۰۸

شکل(۱۱): تغییرات سرعت در(X=0,Y=2.5) و $(X_0 = 0, Y_0 = 0.5)$، برای حالتی که $A_v = 30Km/s$ ۱۰۸

فصل اول

"بررسی منابع"

مقدمه

در این فصل به معرفی مختصر جو خورشید می‌پردازیم و عوارضی موسوم به سیخک‌ها (سیخک‌ها) را با بیان خصوصیات فیزیکی آنها معرفی می‌کنیم، در ادامه ضمن مطرح کردن گرمایش تاج خورشیدی و افزایش ناگهانی دمای این لایه، به بررسی عوامل این گرمایش می‌پردازیم و به طور عمده بر روی نوسانات سیخکی و نوسانات ۵ دقیقه‌ای مشاهده شده در کرونا، که یکی از مهمترین عوامل ایجاد این گرمایش هستند تمرکز می‌کنیم و بحث مختصری درمورد نحوه ایجاد نوسانات ۵ دقیقه‌ای با ارسال پالس های فوتوسفری خواهیم داشت.

۱-۱خورشید

خورشید یکی از میلیاردها ستاره‌ی موجود در کهکشان راه شیری و نزدیک ترین ستاره به ماست. ساختار داخلی خورشید بر پایه تعادل هیدروستاتیکی است که انرژی ناشی از اثرات همجوشی هسته‌ای مانع از سقوط مواد به مرکز خورشید می‌شود. قطر خورشید تقریبا ۱۳۹۲۰۰۰ کیلومتر (حدودا ۱۰۹ برابر قطر زمین)، و جرم آن ۲×۱۰^{۳۳} کیلوگرم (۳۳۰۰۰۰ برابر جرم زمین) است.به طور کلی در حدود ۹۹/۹۸ درصد جرم کل منظومه شمسی در خورشید متمرکز شده است.از نظر ترکیب شیمیایی حدود سه چهارم خورشید متشکل از هیدرژن و مابقی از هلیوم است و کمتر از دو درصد این ساختار از عناصر سنگین‌تر مانند اکسیژن، کربن، نئون و آهن است.

دمای سطحی این ستاره ۵۷۷۸ درجه کلوین است. انرژی خورشید از طریق همچوشی هیدرژن-هلیوم در هسته‌اش تولید می‌شود، بطوری که در هر ثانیه بیش از ۶۰۰ میلیون تن هیدرژن در هسته خورشید می‌سوزد. لذا این ستاره از اغلب ستارگان موجود در کهکشان روشن‌تر است. قدر مطلق آن ۴/۸ و قدر ظاهری آن ۲۶/۷- است.

۱-۱-۱ ساختارداخلی خورشید

خورشید را می‌توان بر اساس خصوصیات فیزیکی و رفتار پلاسما، به سه لایه تقسیم بندی کرد. از مرکز خورشید تا ۲۵ درصد شعاع خورشید را به عنوان هسته[۱] در نظر می گیریم. که محل تامین انرژی خورشید است. چگالی هسته بسیار بالاست (۱۵۰ گرم بر سانتی متر مکعب). دمای این ناحیه

[۱] core

۱۳/۶ میلیون کلوین است. در هر ثانیه زنجیره پروتون-پروتون $۹/۲ \times ۱۰^{۲۷}$ بار در هسته خورشید روی می‌دهد و از آنجایی که در این فرایند ۴ پروتون آزاد (هسته هیدرژن) همزمان درگیر هستند پس در هر ثانیه $۳/۷ \times ۱۰^{۳۸}$ پروتون به ذره آلفا (هسته هلیوم) دگرگون می‌شود. یعنی در هر ثانیه چیزی در حدود ۶۲۰ میلیون تن هیدرژن دچار همجوشی می‌شود، که از این مقدار تنها ۹/۵ میلیون تن تبدیل به انرژی می‌شود و مابقی به هلیوم تبدیل می‌شوند. البته توان تولید انرژی از طریق همجوشی در هسته بسته به فاصله از مرکز خورشید تغییر می کند. بر اساس شبیه سازی انجام شده چنین نتیجه می گیریم که توان در مرکز خورشید $wats/m^۲$ ۲۷۶/۵ است. به این ترتیب در ناحیه درونی، از مرکز تا ۲۴ درصد شعاع خورشید ۹۹/۹ در صد از انرژی کل خورشید فراهم می‌شود و تا ۳۰ درصد شعاع خورشید فرایند همجوشی به طور کامل می‌ایستد و دیگر ادامه نمی‌یابد. حدود دو میلیون سال طول می‌کشد تا انرژی تولید شده در مرکز خورشید به سطح آن برسد و به صورت نور و گرما تابش کند.با توجه به چگالی بالای هسته انتظار داریم هسته جامد باشد ولی به دلیل دمای بسیار بالای آن و اینکه در این دما تمامی عناصر به صورت یونیزه هستند، هسته خورشید نمی‌تواند جامد باشد.

نرخ فرایند همجوشی هسته‌ای که در هسته خورشید رخ می‌دهد درتعادل بسیار ظریفی است که پیوسته خود را اصلاح می‌کند تا همچنان در تعادل بماند. اگر میزان همجوشی هسته‌ای اندکی بیش از مقدار فعلی باشد آنگاه هسته به شدت گرم می‌شود، در برابر نیروی وزن لایه‌های بیرونی از هر سو گسترش می‌یابد تا نرخ همجوشی کاهش یابد و آشفتگی اصلاح شود. برعکس اگر همجوشی اندکی کمتر از مقدار فعلی باشدت هسته سرد شده و دچار جمع شدگی می‌شود، لذا هسته گرمتر شده نرخ همجوشی افزایش می‌یابد و به حالت تعادل باز می‌گردد.[۱]

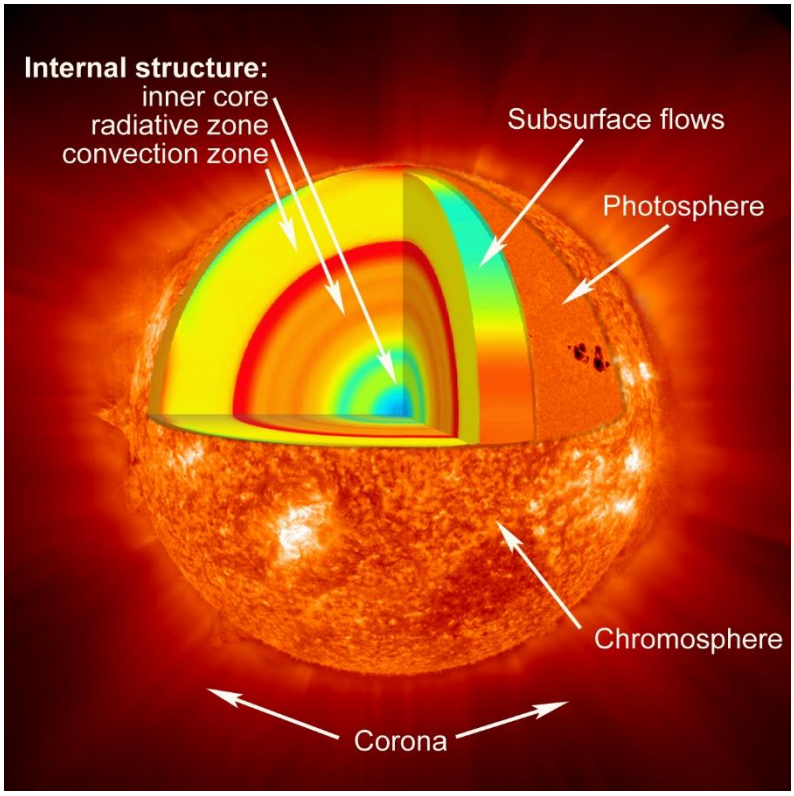
از ۲۵ درصد تا ۷۰ درصد از شعاع خورشید، ناحیه‌ای است که در آن انرژی تولید شده در هسته از طریق فرایند تابش به لایه‌های بالاتر انتقال می‌یابد. این ناحیه به ناحیه تابش[۱] موسوم است. در داخلی‌ترین قسمت این ناحیه دما ۷ میلیون کلوین است در حالی که این مقدار در بالاترین بخش ناحیه به ۲میلیون کلوین کاهش می‌یابد.چگالی نیز در این فاصله حدود ۱۰۰برابر کاهش می‌یابد و ماده داخلی خورشید شفاف‌تر می‌شود.

[۱] Radiation Zone

ناحیه همرفتی[1]، خارجی‌ترین لایه داخلی خورشید است که از ناحیه تابشی تا سطح خورشید ادامه دارد. این ناحیه ۶۶ درصد از حجم خورشید و تنها کمی بیش از ۲ درصد از جرم خورشید را تشکیل می‌دهد. در بالای ناحیه همرفتی خورشید، چگالی نزدیک به صفر است و درجه حرارت در این ناحیه تا ۵۸۰۰ درجه کلوین می‌رسد. در این لایه به دلیل کاهش دما و چگالی، یونها و الکترون‌ها بازترکیب می‌شوند و دیگر پلاسمای خورشید به اندازه کافی داغ نیست تا بتواند انرژی گرمایی درونی را از طریق تابش به لایه‌های بیرونی‌تر برساند. لذا این ناحیه مانند یک سد عمل می‌کند و مانع از انتقال انرژی به روش تابش می‌شود، انرژی در این ناحیه به اجبار به طریق همرفت سلول‌های پلاسمای داغ منتقل می‌شود که نتیجه آن هم ظاهر شدن گرانول‌ها در سطح فوتوسفر خورشید است. هنگامی که مواد درسطح خورشید کمی خنک‌تر می‌شوند دوباره به عمق خورشید یا محل آغاز رفت و برگشت‌های همرفتی فرو می‌ریزند تا دوباره از لایه‌های بالای ناحیه تابشی انرژی دریافت کرده و به بالا صعود کنند.

میان ناحیه تابش و ناحیه همرفتی یک لایه به نام لایه تاچوکلین[2] پدید می‌آید که در ثلث بیرونی شعاع خورشید قرار دارد. در این بخش بین لایه تابش با چرخش یکنواخت و ناحیه همرفتی با چرخش دیفرانسیلی عرضی به خاطر تغییر ناگهانی در رفتار چرخشی، یک شکاف بزرگ پدید می‌آید که در این شکاف لایه‌های افقی پی‌درپی بر روی هم لیز می‌خورند. سرعت جریان سیال در این لایه از بالا به پایین به تدریج کم می‌شود و در پایین‌ترین نقطه ناپدید می‌شود.

[1] Convection Zone
[2] Tachocline



شکل ۱-۱ تصویری از خورشید و بخش‌های تشکیل دهنده آن [۴]

۱-۲ ساختار سطحی و جو خورشید

۱-۲-۱ فوتوسفر[۱](شیدسپهر،نورسپهریا فوتون کره): مواد تشکیل دهنده خورشید حالت گازی دارند، بنابراین خورشید محدوده و مرز دقیق و معینی نداشته و مواد اطراف آن بتدریج در فضا منتشر می‌شوند. اما چنین به نظر می‌رسد که خورشید لبه تیزی داشته باشد چراکه بیشتر نوری که از خورشید به زمین می‌رسد از یک لایه که چندصد کیلومتر ضخامت دارد ساطع می‌شود. این لایه فوتوسفر نام داشته و به عنوان سطح خورشید شناخته شده است. به عبارت دیگرفوتوسفر خارجی‌ترین لایه قابل مشاهده از خورشید است، زیرا در این منطقه نور با طول موج‌های قابل مشاهده از خورشید خارج می‌شود و زیر این لایه از خورشید در برابر نور مرئی کدر می‌شود. تغییر اندازه کدری خورشید به کاهش مقدار یون‌های هیدرژن منفی بستگی دارد چون این یون است که نور مرئی را به آسانی جذب می‌کند. دمای فوتوسفر ۶۴۰۰ کلوین است. اغلب ناحیه فوتوسفر به ارتفاع ۳۰۰ تا ۴۵۰ کیلومتر بالاتر از عمق نوری $\frac{۲}{۳}$ اطلاق می‌شود و معمولا ضخامت آن را ۵۰۰ کیلومتر بیان می‌کنند که این عمق نوری مربوط به طول موج ۵۰۰ نانومتر است که به نور سبز مشهور است. لک‌های خورشیدی و گرانول‌ها در همین لایه تشکیل می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهند که روشنی فوتوسفر یکنواخت نبوده و دانه دانه است و ابعاد و شکل هر کدام از این دانه‌ها که صدها کیلومتر وسعت دارند پیوسته در حال تغییراند. به طور کلی می‌توان از نظر ساختار دمایی و مدل‌های تابشی، فوتوسفر خورشیدی را دارای تعادل ترمودینامیکی محلی (LTE)[۲] دانست.[۲]

[۱] Photosphere
[۲] Local Thermodynamical Equilibrum

۱-۲-۲ کرومسفر[۱] (فام سپهر یا رنگین کره): دما و چگالی این ناحیه نسبت به فوتوسفر به مراتب کمتر است و به‌علت درخشندگی زیاد فوتوسفر این لایه رویت نمی‌شود اما در کسوف کلی نور قرمز کمرنگ را با استفاده از تلسکوپ می‌توان دید. دما در این ناحیه به حداقل مقدار خود، یعنی ۴۴۰۰ کلوین می‌رسد. ضخامت این لایه در حدود ۸۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰ کیلومتر است.رصد این لایه با فیلترHα صورت می‌گیرد وبه دلیل حضور میدان‌های مغناطیسی غیرهمگن است. کرومسفر در زبان یونانی یعنی رنگین و عبارت رنگین‌کره برای این لایه به این علت انتخاب شده که این منطقه بخاطر اینکه اتم‌های هیدرژن در آن در حال جوش و خروشند قسمت قرمز رنگ طیف مرئی را تابش می‌کنند و این ناحیه سرخ رنگ دیده می‌شود.[۳]

در طول خورشید گرفتگی سال ۱۸۸۶ میلادی مطالعات اساسی در مورد کرومسفر شروع شد، در این خورشید گرفتگی مشاهده شد که نواحی رنگی اطراف ماه را فراگرفت و برجستگی‌های رنگی در آن مشاهده شد. در این خورشیدگرفتگی آقای سچی و دانشمندان فرانسوی ساختارهای سیخی شکل که در زبان فرانسوی به آنها پولیز گفته می‌شد را مشاهده کردند. در سال ۱۹۷۰ دانشمندان با قرار دادن شکاف طیف نگار در لبه خورشید در هنگام یک خورشید گرفتگی مشاهده کردند که بسیاری از خطوط طیفی در هنگام گرفت کلی آشکار شد. بعد از کشف فیلتر رنگی توسط آقای لیوت، امروزه می‌توان بر روی قرص خورشید نیز کرومسفر را رصد کرد.[۲]

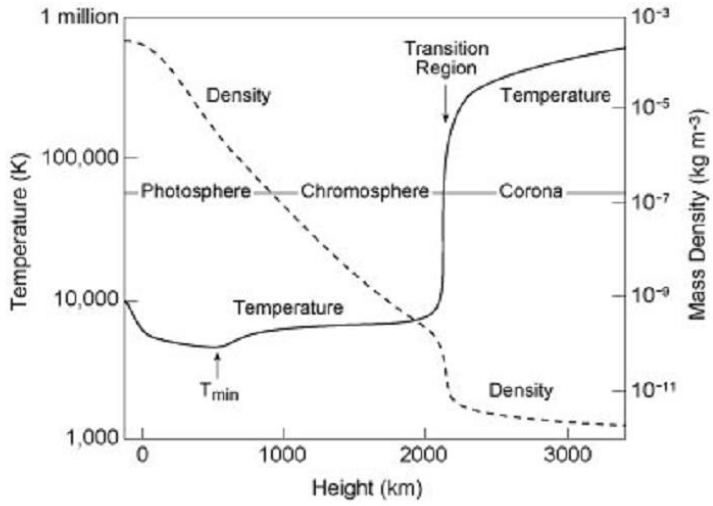
۱-۲-۳ ناحیه انتقالی[۲] یا گذر: بعد از نورسپهر و رنگین سپهر تا ضخامت ۲۰۰۰ کیلومتر ناحیه‌ای قرار دارد که در آن دما از ۲۰۰۰۰ کلوین در بالای رنگین‌سپهر به حدود یک میلیون کلوین در پایین تاج افزایش می‌یابد. این ناحیه را ناحیه گذار می‌نامیم. این ناحیه منطقه بسیار نازک و ناهمگنی است که تاج داغ را از کرومسفر سرد جدا می‌کند و در حرکت از کرومسفر به تاج، چگالی جرمی به شدت کاهش می‌یابد و دما از ۴۴۰۰ کلوین به بیش از یک میلیون کلوین افزایش می‌یابد.این ناحیه در نور مرئی قابل رویت نیست اما در طول موج‌های فرابنفش و فرابنفش دور، توسط ابزارهایی که قابلیت آشکارسازی این طول موجها را دارند، مشاهده‌پذیر است. [۳]

۱-۲-۴ کرونا: لایه بعدی به تاج[۳] معروف است. این لایه از جو خورشید تا چندین برابر شعاع خورشید امتداد می‌یابد و محل اصلی شکل‌گیری باد خورشیدی و پدیده‌هایی از قبیل لوله‌های تاجی، فوران‌های ماده و غیره است. در این ناحیه علی‌رغم چگالی پایین، دما بسیار بالاست؛ یک تا دو

[۱] Chromosphere
[۲] Transition Region
[۳] Corona

میلیون کلوین! این موضـوع به مسـئله گرمایش تاج معروف اسـت. هرچند روندهایی برای بررسـی عوامل این رویداد صـورت گرفته، با این وجود هیچ یک از سـازوکارها نتوانسـته اند تا کنون توجیه کننده‌ی چنین افزایش دمای غیرعادی باشند.[۳]

با وجود دمای چند میلیونی تاج، درخشندگی آن یک میلیون بار کمتر از فوتوسفر است و تنها یک میلیونیوم نور خورشید از طریق تاج منتشر می‌شود، زیرا در مقایسه با کرومسفر چگالی تاج بسیار بسیار ناچیز است، چیزی در حدود یک میلیاردم کیلوگرم بر مترمکعب. به همین دلیل است که رصد تاج فقط در حین کسوف امکان‌پذیر است. اگر بخواهیم تمام فضایی را که از خورشید تاثیر می‌پذیرد لحاظ کنیم، می‌توانیم لایه بیرونی‌تری به نام خورشیدکره[۱] تعریف کنیم. این ناحیه که از حدود ۲۰ برابر شعاع خورشید آغاز می‌شود، ناحیه‌ای است که در آن ذرات متعلق به باد خورشیدی حضور دارند و بر منظومه شمسی تاثیر می‌گذارند.این ناحیه بسیار گسترده فرض می‌شود، به‌طوریکه تا مرزهای منظومه شمسی در نزدیکی مدار سیاره نپتون نیز می‌رسد، هرچند که شدت باد خورشیدی در همه نقاط آن یکسان نیست.

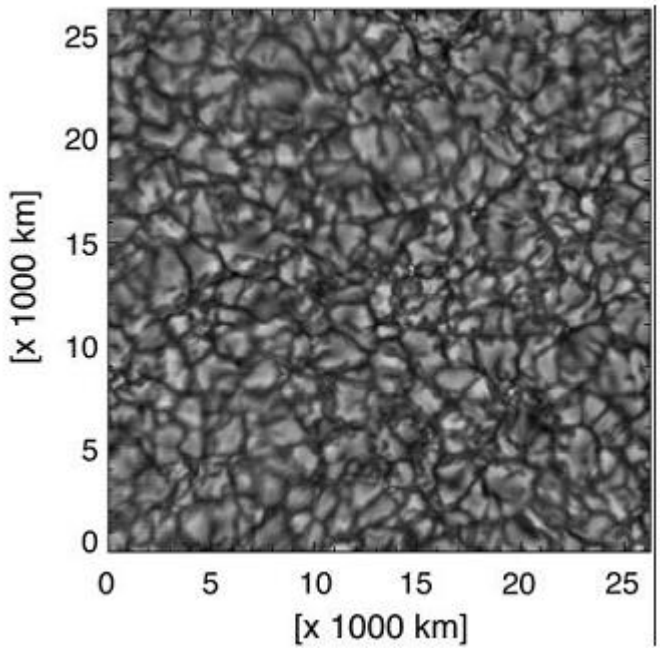


شکل ۱-۲ نمودار تغییرات دما بر حسب ارتفاع در ناحیه تاج خورشید [Eugene Avret]

[۱] Heliosphere

۱-۳ گرانول‌های[۱] خورشیدی

گرانول‌ها ساختارهای حباب مانندی هستند که در فوتوسفر خورشید دیده می‌شوند و به دلیل جریانات همرفتی سلول‌های پلاسمایی ناحیه همرفتی تشکیل می‌شوند. در ناحیه همرفتی توده‌های گاز به سوی سطح خورشید حرکت می‌کنند و انرژی خود را در فوتوسفر تخلیه کرده و پس از تخلیه و کاهش دما، مجددا به داخل خورشید بازمی‌گردند. بخش‌های مرکزی گرانول‌ها به دلیل حمل پلاسمای داغ از قسمت‌های بالای ناحیه تابشی به بخش‌های بالای ناحیه همرفتی ۳۰% روشن‌تر از قسمت‌های اطراف و لبه‌های گرانول‌ها هستند که به دلیل حمل پلاسمای سرد شده به سمت زیرین ناحیه همرفتی در مقایسه با بخش‌های مرکزی تاریکترند. سرعت عمودی صعود و فرود این سلول‌های پلاسمایی در حدود ۲کیلومتر بر ثانیه است. گرانول‌ها حتی در نور سفید نیز در سطح خورشید دیده می‌شوند. شعاع متوسط آنها ۱ مگامتر است و تمام سطح خورشید را پوشانده‌اند.[۵ و۶]



شکل ۱-۳ تصویری از گرانول‌های سطح خورشیدی، رصدخانه ملی نجوم (NOAO)

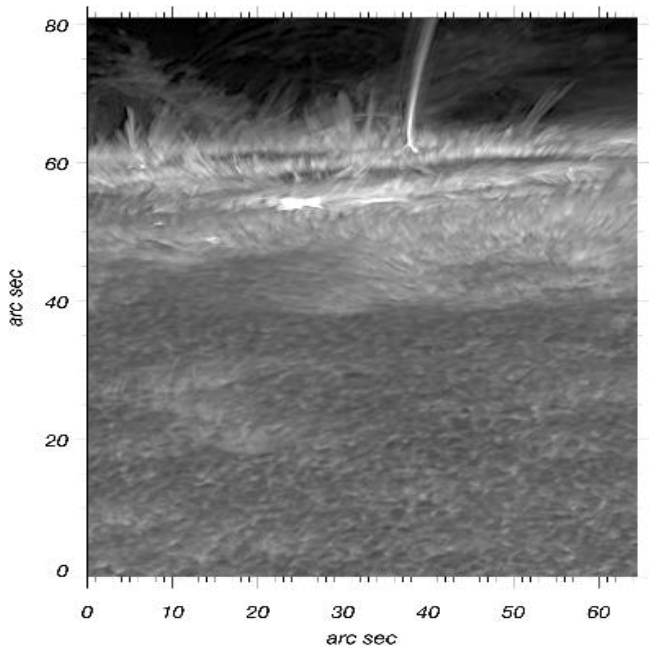
تاکنون دو نوع از سلول‌های همرفتی رصد شده است: گرانول‌ها و ابرگرانول‌ها. گرانول‌ها تقریبا ۱۰۰۰ کیلومتر پهنا دارند، در حالیکه ضخامت ابرگرانول‌ها تا ۳۰۰۰۰ کیلومتر می‌رسد. قطر سلول‌های

[۱] Granules

همرفتی تقریبا ۲ تا ۴ برابر عمق آنهاست، بنابراین سوپرگرانول‌هایی که قطر ۲۰ مگامتر دارند دارای منشای بین ۵ تا ۱۰ مگامتر زیر سطح خورشید هستند. هنگامی که این حباب‌ها در تماس با محیط اطراف خود قرار می‌گیرند گرمای خود را به محیط انتقال داده سرد می‌شوند و به همین دلیل یک اختلاف شدت بین ناحیه میانی و نواحی مرزی آن وجود دارد. طول عمر سوپرگرانول‌ها تقریبا ۱ روز است. البته طول عمر ۲ تا ۴ روز هم دیده شده است. معمولا طول عمر انها را بین ۱۵ تا ۳۰ ساعت در نظر می‌گیرند. [۵ ، ۶]

۱-۴ ماتل‌های[۱] خورشیدی

ماتل ها پدیده‌های روشن و تاریک هستند که در فیلتر Hα روی قرص خورشید دیده می‌شوند. این ساختارها همان سیخک‌ها هستند که روی دیسک خورشید می‌توان با همان فیلتر مشاهده کرد. ماتل‌ها حرکات روبه بالا و پایینی در راستای محور اصلیشان دارند. همچنین حرکات عرضی هم از خود نشان می‌دهند. دلیل روشن و تاریک دیده شدن آنها تفاوت در فشار گاز در ماتل‌ها است. ضخامت ماتل‌ها ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر و طول آنها حدود ۱۲ تا ۲۰ دقیقه است. خواص نوسانی ماتل‌ها نشان‌دهنده تشکیل آنها از طریق شوک‌های مغناطیسی صوتی است.



شکل ۱-۴ تصویری از ماتل های رصد شده توسط Hinode/SIT

[۱] Mottles