دانشکده‌ی علوم- گروه فیزیک

پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد فیزیک

گرایش اخترفیزیک

گرمایش تاج خورشیدی از طریق اثر اختلاط فازی امواج آلفن در سیخک‌های خورشیدی

حامد الطافی مهربانی

اساتید راهنما

دکتر حسین صفری

دکتر حسین عبادی

مهرماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به...

پدر،

مادر،

و برادرم.

تشکر و قدردانی

در ابتدا لازم می‌دانم از اساتید راهنمای این پایان‌نامه و همه‌ی کسانی که مرا در انجام این کار راهنمائی فرمودند تشکر و قدردانی کنم. از پروفسور بارت دی پونتیه، از مرکز فضائی لاکهیدمارتین که در مراحل مختلف انجام کار، نکات مفیدی را به ما گوشزد نمودند سپاسگذاری می‌کنم. همچنین از پروفسور والری ناکاریاکف، که بیشتر مخالف ایده‌های ما بودند تا موافق(!) و انتقادهای سازنده داشتند سپاسگذارم. از آقای دکتر محبوب حسین‌پور به خاطر معرفی و در اختیار گذاشتن کد و روش ریاضی مورد استفاده در انجام برخی محاسبات عددی قدردانی می‌کنم. همچنین لازم است مراتب تشکر خود را از گروه هدایت کننده‌ی فضاپیمای ژاپنی هینوده، که از داده های رصدی آنان در بخشی از این بررسی استفاده کردیم اعلام نمایم.

چکیده

مسئله‌ی گرمایش تاج خورشید یکی از مسائل حل‌نشده در زمینه‌ی فیزیک خورشید است. تاکنون روش های مختلفی برای توجیه افزایش غیر عادی دما در تاج خورشید ارائه و بررسی شده است، مثل گرمایش بوسیله‌ی امواج صوتی و روش‌هائی با منشاء مغناطیسی مانند امواج آلفن، جذب تشدیدی و اتصال مجدد مغناطیسی. اختلاط فازی امواج آلفن منتشر شونده در ساختارهای مغناطیسی خورشید نیز یکی از روش هائی است که اخیرا در این زمینه مطرح شده است. اگر محیطی که امواج آلفن در آن منتشر می‌شوند دارای ناهمگنی در میدان مغناطیسی یا چگالی یا هردوی این‌ها باشد، امواج آلفن در خطوط مجاور با سرعت‌های مختلف منتشر می‌شوند و این فرآیند سبب ایجاد اختلاط فازی ضمن انتشار موج و میرائی انرژی آن می‌شود.

اسپیکول‌ها (سیخک‌ها) ساختارهائی در رنگین‌سپهر خورشیدند که رفتار نوسانی از خود نشان می‌دهند. نوسانات محور اسپیکول‌ها و جابجائی عرضی آن‌ها توسط افراد مختلفی مطالعه شده است. برخی از آنان این امواج را از نوع کینک‌وجه‌ها در نظر می‌گیرند در حالی که برخی دیگر اعتقاد دارند امواج آلفن عامل ایجاد نوسانات مشاهده شده در اسپیکول‌ها هستند. ما فرض می‌کنیم این امواج از نوع آلفن باشند و اختلاط فازی آنها را در محیط لایه‌بندی شده‌ی اسپیکول‌ها در حضور سرعت زمینه‌ی غیر صفر بررسی می‌کنیم. بررسی‌ها نشان می‌دهند که این امواج می‌توانند در زمان‌ها و فواصل قابل مقایسه با طول عمر و ارتفاع اسپیکول‌ها میرا شوند و انرژی خود را در محل نسبتا مناسب، در تاج پائین و رنگین‌سپهر بالای خورشید تخلیه کنند. زمان‌های میرائی و طول میرائی با مقادیر پیش‌بینی شده توسط بررسی‌های قبلی سازگاری خوبی دارد. لذا می‌توانیم انتظار داشته باشیم که این فرآیند یکی از سازوکارهای مؤثر در گرمایش تاج خورشید باشد. با این حال شواهد رصدی مورد نیاز است تا این موضوع بیشتر بررسی و اثبات شود.

واژه های کلیدی: اختلاط فازی. اسپیکول‌ها. مغناطوهیدرودینامیک. نوسانات.

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: مقدمه و تعاریف

۱-۱: خورشید..... ۱

۱-۱-۱: لایه‌های داخلی خورشید..... ۱

۱-۱-۲: لایه‌های سطحی و جو خورشید..... ۲

۱-۱-۳: پارامتر بتا (β) در جو خورشید..... ۴

۱-۲: مسئله‌ی گرمایش تاج خورشید..... ۵

۱-۲-۱: گرمایش بوسیله‌ی امواج صوتی..... ۵

۱-۲-۲: نقش میدان مغناطیسی و امواج آلفن..... ۶

- اتصال مجدد مغناطیسی..... ۷

- جذب تشدیدی..... ۷

- اختلاط فازی..... ۸

۱-۳: اسپیکول‌ها (سیخک‌ها)..... ۸

۱-۳-۱: ویژگی‌های فیزیکی و ظاهری اسپیکول‌ها..... ۱۱

قطر..... ۱۱

طول..... ۱۱

دما و چگالی..... ۱۲

حرکات و طول عمر..... ۱۳

تعداد..... ۱۴

۱-۴: فیزیک امواج آلفن.....۱۵

۱-۴-۱: امواج آلفن برشی.....۱۶

۱-۴-۲: آشنائی با روش اختلاط فازی امواج آلفن برشی.....۱۷

فصل دوم: مدل نوسانات در اسپیکول‌ها و اختلاط فازی

۲-۱: نظریه‌ی مغناطوهیدرودینامیک MHD ۱۸

۲-۱-۱: معادلات ماکسول.....۱۸

۲-۱-۲: قانون آمپر.....۱۹

۲-۱-۳: قانون اهم.....۱۹

۲-۱-۴: معادله‌ی القای مغناطیسی.....۲۰

۲-۱-۵: معادلات مغناطوهیدرودینامیک ایده‌آل.....۲۱

۲-۲: رابطه‌ی پاشندگی امواج مغناطوهیدرودینامیک.....۲۲

۲-۲-۱: امواج در باریکه‌ی مغناطیسی واقع در محیط مغناطیسی.....۲۷

۲-۲-۲: امواج سطحی و حجمی.....۲۹

۲-۲-۳: حرکت‌های غیرتراکمی.....۳۰

۲-۲-۴: امواج در باریکه مغناطیس واقع در محیط غیر مغناطیسی (ایزوله شده)..... ۳۱

۲-۳: نوسانات در اسپیکول‌ها..... ۳۲

۲-۳-۱: نمونه‌های پدیده‌های نوسانی در اسپیکول‌ها..... ۳۳

– بررسی‌های گادزیف و نیکولسکی..... ۳۳

– بررسی‌های کوخیانیدزه و همکاران..... ۳۵

– بررسی‌های بارت دی پونتیه و همکاران..... ۳۷

۲-۳-۲: بررسی نوسانات در اسپیکول‌ها با استفاده از داده‌های هینوده..... ۴۰

۲-۴: مدل آلفن برای نوسانات در اسپیکول‌ها..... ۴۵

۲-۵: تعبیرهای ممکن از نوسانات اسپیکول‌ها: کینک‌وجه‌ها یا امواج آلفن؟..... ۴۹

۲-۶: اختلاط فازی امواج آلفن..... ۵۲

۲-۶-۱: اختلاط فازی در امواج رونده..... ۵۵

۲-۶-۲: اختلاط فازی در امواج ایستاده..... ۵۷

۲-۷: مروری بر کارهای انجام شده..... ۶۳

فصل سوم: اختلاط فازی امواج آلفن در اسپیکول‌ها

۳-۱: مدل فیزیکی حاکم بر اسپیکول‌ها..... ۶۶

۳-۲: معادلات توصیف کننده‌ی مدل..... ۶۷

۳-۳: حل عددی معادلات و بررسی نمودارها و نتایج..... ۷۱

۳-۴: خلاصه‌ی نتایج..... ۸۳

۳-۵: پیشنهادات برای کارهای آینده..... ۸۳

مراجع..... ۸۵

چکیده‌ی انگلیسی..... ۸۸

فهرست جدولها

شماره‌ی جدول صفحه

جدول ۱-۱: دما و چگالی الکترونی اسپیکول‌ها در ارتفاعات مختلف از سطح خورشید.....۱۳

جدول ۲-۱: خلاصه‌ی نتایج بررسی رصدی نوسانات در اسپیکول‌ها.....۳۹

فهرست شکلها

نام شکل صفحه

شکل ۱-۱: تصویری از اسپیکول‌های لبه خورشید... ۱۰

شکل ۱-۲: تصویری از اسپیکول‌های قرص خورشید... ۱۱

شکل ۱-۳: امواج آلفن... ۱۸

شکل ۲-۱: نمودار قطبی سرعت فاز امواج مغناطو- صوتی... ۲۷

شکل ۲-۲: وجوه نوسانی کینک و سوسیسی... ۳۰

شکل ۲-۳: تغییرات زمانی سرعتهای دوپلری و عرضی V_r و V_t ... ۳۴

شکل ۲-۴: مسیر حرکت ۹ اسپیکول از ۱۵ اسپیکول مطالعه شده... ۳۵

شکل ۲-۵: توزیع مکانی انتقال دوپلری برای یکی از سری های زمانی... ۳۶

شکل ۲-۶: مقایسه‌ی سرعتهای دوپلری مشاهده شده و جواب حاصل از حل معادله‌ی کینک وجه‌ها... ۳۷

شکل ۲-۷: تصاویر ۱ تا ۹ از سری زمانی تهیه شده از پردازش داده‌های تهیه شده توسط هینوده ... ۴۱

شکل ۲-۸: تصاویر ۱۰ تا ۱۸ از سری زمانی تهیه شده از پردازش داده‌های تهیه شده توسط هینوده... ۴۲

شکل ۲-۹: تصاویر ۱۹ تا ۲۷ از سری زمانی تهیه شده از پردازش داده‌های تهیه شده توسط هینوده... ۴۳

شکل ۲-۱۰: ۹ تصویر برگزیده از سری زمانی فوق برای نشان دادن رفتار تناوبی محور اسپیکول... ۴۴

شکل ۲-۱۱: تغییرات دامنه‌ی جابجائی محور اسپیکول بر حسب ارتفاع... ۴۵

شکل ۲-۱۲: نمونه‌ای از جابجای عرضی محور اسپیکول‌ها... ۴۶

شکل ۲-۱۳: (A) تصویری از لبه‌ی خورشید که از رصدهای ذکر شده به دست آمده است... ۴۷

شکل ۲– ۱۴: مقایسه بین جابجائی‌های عرضی و دامنه‌های سرعت مشاهده شده و شبیه شازی شده.....۴۸

شکل۲–۱۵: تصویری از شبیه سازی انجام شده در خصوص انتشار امواج آلفن.....۴۹

شکل ۲–۱۶: نمودار جابجای پلاسما در یک موج رونده با فرکانس ثابت در چند ارتفاع مختلف.....۵۴

شکل ۲–۱۷: مدل فیزیکی برای بررسی اختلاط فازی امواج رونده.....۵۵

شکل ۲–۱۸: مدل فیزیکی برای بررسی اختلاط فازی امواج ایستاده.....۵۹

شکل ۳–۱: نمای سرعت اختلالی در لحظه‌ی اول ۷۳

شکل ۳–۲: تغییرات زمانی سرعت اختلالی در مرکز ناحیه و ارتفاع ۱/۲ مگامتر.....۷۴

شکل ۳–۳: تغییرات زمانی سرعت اختلالی در مرکز ناحیه و ارتفاع ۲ مگامتر..... ۷۴

شکل ۳–۴: تغییرات زمانی سرعت اختلالی در مرکز ناحیه و ارتفاع ۲/۸ مگامتر ۷۵

شکل ۳–۵: تغییرات زمانی میدان مغناطیسی اختلالی در مرکز ناحیه و ارتفاع ۱/۲ مگامتر..... ۷۶

شکل ۳–۶: تغییرات زمانی میدان مغناطیسی اختلالی در مرکز ناحیه و ارتفاع ۲ مگامتر ۷۷

شکل ۳–۷: تغییرات زمانی میدان مغناطیسی اختلالی در مرکز ناحیه و ارتفاع ۲/۸ مگامتر ۷۷

شکل ۳–۸: نمودار تغییرات زمانی انرژی جنبشی (نرمالیزه شده به انرژی کل اولیه).....۷۸

شکل ۳–۹: نمودار تغییرات زمانی انرژی مغناطیسی (نرمالیزه شده به انرژی کل اولیه) ۷۹

شکل ۳–۱۰: تغییرات زمانی انرژی کل (نرمالیزه شده به انرژی کل اولیه).....۸۰

شکل ۳–۱۱: تغییرات زمانی انرژی کل به ازای مقادیر مختلف پهنای پالس ۸۱

فصل اول

مقدمه و تعاریف

در این فصل به معرفی مختصر جو خورشید می‌پردازیم و ضمن مطرح کردن مسئله‌ی گرمایش تاج، برخی از سازوکارهائی را که تا کنون برای حل این مسئله مطرح شده است مرور می‌کنیم. در ادامه عوارضی موسوم به اسپیکول‌ها (سیخکها) را معرفی و خصوصیات فیزیکی آن‌ها را بررسی می‌کنیم. سپس به معرفی امواج آلفن و آشنائی اولیه با روش اختلاط فازی می‌پردازیم.

۱-۱: خورشید

خورشید یکی از میلیاردها ستاره‌ی موجود در کهکشان راه شیری و نزدیکترین ستاره به ماست بطوری که تنها ۸/۲ دقیقه طول می‌کشد تا نور خورشید به زمین برسد. قطر خورشید ۱۳۹۲۰۰۰ کیلومتر (حدود ۱۰۹ برابر قطر زمین) و جرم آن ۲×۱۰^{۳۳} کیلوگرم (۳۳۰۰۰۰ برابر جرم زمین) است. حدود ۹۹/۹۸ درصد جرم کل منظومه‌ی شمسی در خورشید متمرکز شده است. از نظر ترکیب شیمیائی، حدود سه چهارم خورشید از هیدروژن تشکیل شده است و مابقی آن تقریبا هلیوم است و تنها کمتر از ۲ درصد این ترکیب شامل عناصر سنگین تر مانند اکسیژن، کربن، نئون و آهن است.

خورشید ستاره ای از رده‌ی طیفی G2 است و بنابراین دمای سطحی برابر با ۵۷۷۸ کلوین دارد. انرژی خورشید از طریق همجوشی هیدروژن- هلیوم در هسته اش تولید می‌شود، بطوری که در هر ثانیه بیش از ۶۰۰ میلیون تن هیدروژن در هسته‌ی خورشید می‌سوزد. با این توصیف، خورشید از بیش از ۸۳ در صد انواع ستاره‌های موجود در کهکشان روشن تر است. قدر مطلق خورشید ۴/۸ و قدر ظاهری آن برای ناظر زمینی، ۲۶/۷- است.

۱-۱-۱: لایه‌های داخلی خورشید

داخل کره‌ی خورشید را می‌توان بر اساس خصوصیات فیزیکی و رفتار پلاسما، به سه لایه تقسیم‌بندی کرد. از مرکز تا ۲۵ درصد شعاع خورشید را به عنوان هسته در نظر می‌گیریم که به منزله‌ی راکتور هسته‌ای خورشید و محل تولید انرژی است. چگالی هسته بسیار بالاست: ۱۵۰ گرم بر سانتیمتر مکعب (۱۵۰ برابر چگالی آب). دمای این ناحیه ۱۳/۶ میلیون کلوین است.

از ۲۵ درصد تا ۷۰ درصد شعاع خورشید، ناحیه ای است که درآن انرژی تولید شده در هسته از طریق فرآیند تابش به لایه‌های بالاتر انتقال می‌یابد. این ناحیه به ناحیه‌ی تابشی موسوم است. در داخلی‌ترین قسمت این ناحیه دما ۷ میلیون کلوین است در حالی که این مقدار در بالاترین بخش ناحیه به ۲ میلیون کلوین کاهش می‌یابد. چگالی نیز در این فاصله حدود ۱۰۰ برابر کاهش می‌یابد و ماده‌ی داخلی خورشید شفاف‌تر می‌شود.

از ۷۰ درصد شعاع تا سطح خورشید، ناحیه ای است که انرژی بصورت همرفت منتقل می‌شود (ناحیه‌ی همرفتی). سلول‌های عظیم پلاسمای داغ، انرژی را از بالای لایه‌ی تابشی به سطح خورشید آورده، سرد می‌شوند و دوباره به داخل خورشید منتقل می‌شوند و این فرآیند ادامه می‌یابد. اثر این سازوکار را ما در سطح خورشید بصورت دانه‌دانه شدن سطح می‌بینیم.

۱-۱-۲: لایه‌های سطحی و جو خورشید

سطح مرئی خورشید، یعنی قسمتی از خورشید که از زمین در نور مرئی قابل رویت است، لایه ای از سطح است که در زیر آن پلاسمای خورشید برای عبور فوتونهای نور مرئی کدر می‌شود. این لایه را با نام نورسپهر[1] خورشید می‌شناسیم. نورسپهر چند صد کیلومتر ضخامت دارد و چگالی و ترکیب آن به گونه ای است که از هوای موجود در جو زمین نیز شفاف‌تر است. چگالی عددی ذرات (الکترونها و پروتونها) در حدود $۱۰^{۲۳}$ بر متر مکعب است و این مقدار ۰/۳۷ درصد چگالی ذرات جو زمین در سطح دریاست، هر چند که ذرات تشکیل دهنده‌ی جو، بیش از ۸۰ بار سنگینتر از ذرات سازنده‌ی نورسپهر خورشیداند. نورسپهر محل قرار گیری برخی از عوارض و ساختارهای مهم خورشید است، مثل لکه‌ها و سلولها یا دانه‌های همرفتی. این عوارض نشاندهنده‌ی سرنخ‌هائی از فعالیت‌های داخلی خورشیدند و بررسی دقیق آن‌ها می‌تواند به مدلسازی بهتر فرآیندهای داخلی خورشید و همچنین به شناخت بیشتر و دقیقتر شرایط آب و هوائی زمین منجر شود.

[1] Photosphere

لایه‌ی بعد از نورسهر، رنگین‌سپهر[۱] نام دارد که تا ارتفاع ۲۰۰۰ کیلومتری بالای نورسپهر امتداد می‌یابد. این لایه، با دمای ۱۰۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ کلوین ، تنها در گرفت‌های کلی خورشید قابل مشاهده است. برخی از ساختارهای عمده در جو خورشید مثل زبانه‌ها، سیخکها و شراره‌ها بیشتر در این لایه اتفاق می‌افتند. از این رو رنگین‌سپهر بسیار پویا و فعال است، با این‌حال به دلیل محدودیت‌های فنی و دقت ابزارها و رصدخانه‌های زمینی و فضائی، کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است.

بعد از رنگین‌سپهر تا ضخامت ۲۰۰۰ کیلومتر، ناحیه ای قرار دارد که در آن دما از ۲۰۰۰۰ کلوین در بالای رنگین‌سپهر به حدود یک میلیون کلوین در پائین تاج افزایش می‌یابد. این ناحیه را ناحیه‌ی گذار[۲] می‌نامیم. ناحیه گذار در نور مرئی قابل رویت نیست، اما در طول موجهای فرابنفش و فرابنفش دور، توسط ابزارهائی که قابلیت آشکارسازی این طول موجها را دارند، مشاهده پذیر است.

ناحیه‌ی بعدی به تاج[۳] معروف است. این لایه از جو خورشید تا چندین برابر شعاع خورشید امتداد می‌یابد و محل اصلی شکل گیری باد خورشیدی و عوارضی از قبیل لوله‌های تاجی، فوران‌های ماده و غیره است. دما در تاج، علی رغم چگالی پائین ($۱۰^{۱۵}$ ذره بر متر مکعب) بسیار بالاست ؛ یک تا دو میلیون کلوین! این موضوع که به مسئله‌ی گرمایش تاج معروف است، از جمله‌ی اسرار گشوده نشده‌ی فیزیک خورشید است که تا کنون پاسخ قطعی به آن داده نشده است. هر چند سازوکارهای مختلفی در مقاطع زمانی مختلف مطرح شده است (که برخی از مهمترین آن‌ها را در ادامه مرور خواهیم کرد)، با این حال هیچ کدام از این سازوکارها تا کنون نتوانسته است توجیه کننده‌ی چنین افزایش دمای غیر عادی باشد.

اگر بخواهیم تمام فضائی را که از خورشید تاثیر می‌پذیرد لحاظ کنیم، می‌توانیم لایه‌ی بیرونی‌تری به نام خورشید کره[۴] تعریف کنیم. این ناحیه که از حدود ۲۰ برابر شعاع خورشید آغاز می‌شود، ناحیه ای است که در آن ذرات متعلق به باد خورشیدی حضور دارند و بر منظومه‌ی شمسی تاثیر می‌گذارند. خورشید کره بسیار گسترده فرض می‌شود، بطوری که تا مرزهای منظومه‌ی شمسی در نزدیکی مدار سیاره‌ی نپتون نیز

---

۱ Chromsphere
۲ Transition Region
۳ Corona
۴ Heliosphere

می‌رسد، هر چند که شدت، سرعت و اثر گذاری باد خورشید در همه‌ی قسمت‌های این ناحیه یکسان نیست.

۱-۱-۳: پارامتر بتا (β) در جو خورشید

میدان مغناطیسی خورشید بر ذرات متحرک در جو آن، نیروی لورنتس وارد می‌کند که باعث می‌شود این ذرات در یک مسیر مارپیچی حول خطوط میدان حرکت کنند. تنها در دماهای بالا یا میدان‌های مغناطیسی ضعیف که انرژی جنبشی ذرات از انرژی مغناطیسی بیشتر می‌شود، این ذرات می‌توانند از مسیر مارپیچشان خارج شوند و در عرض خطوط میدان مغناطیسی نفوذ یابند.

پارامتری که ارتباط بین این دو حالت را برقرار می‌کند، پارامتر بتای پلاسما نام دارد و بصورت نسبت فشار حرارتی به فشار مغناطیسی تعریف می‌شود [۱]. بر حسب پارامترهای فیزیکی پلاسما، می‌توان بتا را بصورت زیر تعریف کرد:

$$\beta = \frac{p_{th}}{p_m} = \frac{2\xi n_e k_B T_e}{B^2/8\pi} \approx \frac{0.07\xi\left(\frac{n_e}{10^9}cm^{-3}\right)\left(\frac{T}{10^6}K\right)}{\left(\frac{B}{10^6}G\right)} \qquad (۱-۱)$$

که در آن ξ نسبت یونیزاسیون است که در تاج خورشید مقدار آن ξ=۱ و در نورسپهر ξ=۰/۵ است. k_B ثابت بولتزمن، n_e چگالی الکترونی و T_e دمای الکترونی است.

بسیاری از قسمت‌های تاج خورشید دارای بتای کوچکتر از واحد هستند که بین دو ناحیه‌ی رنگین‌سپهر پائین و تاج خارجی خورشید ($\beta > 1$) محدود شده اند. ذرات در این نواحی بصورت مغناطیسی مقید شده اند و در حرکت خود مسیر خطوط میدان را دنبال می‌کنند. برای ناحیه ای که اسپیکول‌ها در آن قرار دارند، با فرض مقادیر $\xi = 0.6$ ، $n_e = 12.7 \times 10^{10}$ ، $T = 8000\ K$ و $B = 10G$ مقدار این پارامتر برابر با $\beta = 0.04$ بدست می‌آید. بنابراین شرط $\beta < 1$ برای ناحیه ای که اسپیکول‌ها قراردارند با دقت بسیار خوبی برقرار است.

۱-۲: مسئله‌ی گرمایش تاج خورشید

اگر روند تغییرات دمای خورشید را از هسته به طرف سطح و پس از آن تا لایه‌های خارجی جو بررسی کنیم، روند نسبتا نامتعارفی را خواهیم یافت. دما در هسته ۱۵ میلیون کلوین است، با دور شدن از هسته دما کاهش می‌یابد و به دمای سطحی ۵۸۰۰ کلوین در نورسپهر خورشید می‌رسد. با ورود به جو بیرونی خورشید، این روند بر عکس می‌شود و با افزایش دمائی مواجه می‌شویم که در لایه‌های بالای رنگین‌سپهر، مقدارش به ۱۰۰۰۰ کلوین نیز می‌رسد. در این ارتفاع از سطح خورشید، در ناحیه ای موسوم به ناحیه‌ی گذار، دما به یکباره به مقادیری از مرتبه چند میلیون کلوین صعود می‌کند. این دما در سراسر تاج حورشید حاکم است، بطوری که بیرونی‌ترین و رقیق‌ترین لایه‌ی جو خورشید همواره دارای چنین دماهای بالائی است. این مسئله به گرمایش تاج خورشید معروف است و موضوعی است که علی رغم مطرح شدن سناریوهای مختلف، تاکنون پاسخ قطعی و روشنی به آن داده نشده است [۲].

تاج خورشید بین دو ناحیه با دمای پائین تر واقع شده است: نورسپهر و فضای میان‌سیاره‌ای. در چنین شرایطی تاج خورشید انرژی خود را بطور پیوسته از طریق تابش، رسانش و باد خورشیدی از دست می-دهد. برای اینکه دمای تاج کماکان بالا باشد لازم است منبع مناسبی از انرژی برای گرمایش آن فراهم باشد. این منبع نمی‌تواند حرارتی باشد، زیرا به دلیل هدایت گرمائی زیاد تاج، دما به سرعت متعادل می-شود. منبع تابشی نیز تاثیر کافی ندارد، زیرا یونهای هیدروژن، هلیوم، آهن، کلسیم، نیکل و کبالت موجود در تاج نمی‌توانند تابش رسیده از نورسپهر را جذب کنند. بنابراین باید منبع حرکات مکانیکی یا میدان‌های مغناطیسی، و یا ترکیبی از این دو سبب فراهم شدن انرژی لازم باشند.

۱-۲-۱: گرمایش بوسیله‌ی امواج صوتی

اولین نظریه‌ای که برای حل این مسئله مطرح شد، گرمایش توسط امواج صوتی منتشر شده در جو خورشید بود [۳]. منشاء این امواج حرکات ناحیه‌ی همرفتی در نورسپهر خورشید است که در ادامه به امواج صوتی و ضربه ای تبدیل شده و در جو خورشید انتشار می‌یابند. با این حال اکنون مشخص شده است که این امواج انرژی کافی برای گرم کردن تاج ندارند و نهایتا می‌توانند در جو پائین خورشید، در

نورسپهر سبب افزایش نسبی دما شوند. در واقع این انرژی چندین مرتبه‌ی مقداری از انرژی لازم برای گرم شدن تاج کمتر است. امواج صوتی با دوره‌ی کوچکتر از دوره‌ی قطع (حدود ۲۰۰ الی ۳۰۰ ثانیه) می‌توانند نورسپهر را گرم کنند. امواج صوتی با دوره‌ی ۴۰ تا ۶۰ ثانیه در نورسپهر پائین، و امواجی با دوره‌های بیشتر مثل ۳۰۰ ثانیه، در نورسپهر بالا پراکنده می‌شوند و اصلا به ناحیه‌ی تاج وارد نمی‌شوند [۱].

۱-۲-۲: نقش میدان مغناطیسی و امواج آلفن

مدل‌های امروزی گرمایش تاج بر اساس میدان مغناطیسی خورشید تنظیم شده‌اند. از ویژگی‌های حضور چنین میدانی در یک محیط پلاسمائی، وجود امواجی موسوم به امواج آلفن است. این امواج با سرعت آلفن در محیط منتشر می‌شوند. مدت زمانی که طول می‌کشد تا این امواج در یک ساختار مغناطیسی (مانند حلقه‌های تاجی) منتشر شوند زمان آلفن نامیده می‌شود. اگر زمان لازم برای وقوع پدیده‌های فیزیکی جو خورشید، مثلا حرکات نورسپهری که منجر به واپیچیدگی لوله‌های شار مغناطیسی می‌شود، از زمان آلفن بیشتر باشد امواج مغناطوهیدرودینامیکی تولید می‌شوند و می‌توانند در ادامه طی فرآیندهائی سبب گرمایش تاج شوند.

در صورتی که بازه زمانی فوق، از زمان آلفن کمتر باشد، حرکات سطح خورشید سبب ایجاد میدان‌های جریانی- مغناطیسی می‌شوند و این میدان‌ها به تاج خورشید نفوذ می‌کنند و در آنجا خطوط میدان با متصل شدن به همدیگر از طرف قطبهای مخالف، سبب آزاد شدن انرژی می‌شوند. به این ترتیب انرژی مغناطیسی به انرژی جنبشی ماده‌ی بالا رونده تبدیل می‌شود. این انرژی جنبشی از طریق فرآیندهای چسبندگی و اصطکاک، منجر به گرم شدن تاج می‌شود.(این فرآیند به اتصال مجدد مغناطیسی [۱] معروف است). با این‌حال به دلیل اینکه امواج آلفن به سختی میرا می‌شوند [۴]، روشهای غیر مستقیم برای دادن انرژی این امواج به محیط تاجی مطرح شده است. در زیر چند نمونه از این روشها را مرور می‌کنیم.

[۱] Magnetic Reconnection

- اتصال مجدد مغناطیسی

یکی از مکانیزم‌هائی که اخیرا در مورد گرمایش تاج خورشید مطرح شده است، اتصال مجدد خطوط میدان مغناطیسی در رنگین‌سپهر خورشید است که از طریق فرایندهای ثانویه ای مانند تولید امواج ضربه‌ای مغناطو- صوتی یا ایجاد جریان‌های رو به بالای پلاسمای داغ، سبب گرم شدن تاج می‌شود. در این فرآیند، خطوط میدان با قطبشهای مغناطیسی مخالف که بصورت کاتوره‌ای در حرکت هستند به هم برخورد می‌کنند و انرژی حاصل از این برخورد در محیط آزاد می‌شود. به نظر می‌رسد درخششهائی که بصورت نقاط روشن در تصاویر اشعه‌ی ایکس خورشید ظاهر می‌شوند، نمود ظاهری این پدیده باشند.

شبیه سازیهای انجام شده در مورد پدیده‌ی اتصال مجدد نشان می‌دهد که ایجاد لوله‌های شار کوچکتر و قطعه قطعه شده، جریان‌های الکتریکی قوی، امواج مغناطو- صوتی سریع و جریانات بالارونده‌ی پلاسما از جمله‌ی آثار رخ دادن چنین پدیده ای هستند. امواج ضربه‌ای ایجاد شده می‌توانند با سایر لوله‌های شار مغناطیسی برخورد کنند و سبب ایجاد امواج آلفن سطحی در آن‌ها شوند.

برخوردهای بین ساختارهای مغناطیسی کوچک مقیاس نتایج پیچیده تری به دنبال دارد و می‌تواند سبب ایجاد امواج ضربه‌ای با جبهه‌ی موج خمیده (غیر صفحه‌ای) شود که با انتشار یافتن در محیط، این خمیدگی بیشتر می‌شود. چنین جبهه‌های موج خمیده ای متحمل گرادیان‌های بزرگ شتاب می‌شوند و برخوردهای بعدی بین آن‌ها سبب گرمایش موضعی و فوران ماده به ناحیه‌ی تاج می‌شود.

- جذب تشدیدی[1]

یکی از ویژگیهای مهم امواج آلفن در محیط ناهمگن این است که خطوط میدان مغناطیسی مجاور می‌توانند با فرکانس خاص خود نوسان کنند. بنابراین یک نوسان کلی در منطقه‌ی وسیعی از جو خورشید که شامل ناهمگنی در میدان یا چگالی باشد، می‌تواند با یکی از این فرکانسهای موضعی در تشدید باشد و فرکانس نوسان این دو موج یکسان شود. به این ترتیب انرژی نوسانات بزرگ مقیاس، به نوسانات موضعی منتقل می‌شود و طول مقیاسهائی ایجاد می‌شود که در آن اتلاف انرژی امواج امکان پذیر می‌شود [۵]. در

[1] Resonant Absorption