

صلى الله عليه وسلم



دانشگاه سبزگان

دانشکده علوم

گروه فیزیک

امواج پیچشی طول موج بلند در جت‌های تاج خورشید

پایان نامه کارشناسی ارشد

عمران قنبری

اساتید راهنما :

دکتر سهیل واشقانی فراهانی

دکتر حسین صفری

اسفند ۹۱

در کمال افتخار و امتنان تقدیم به:

- پدر و مادر عزیزم....

به خاطر همه‌ی تلاشهای محبت آمیزی که در طول زندگی‌ام انجام داده‌اند

به آنان که نفس خیرشان و دعای روح پرورشان بدرقه‌ی راهم بود

و با مهربانی چگونه زیستن را به من آموخته‌اند.

قدردانی و تشکر

حمد و سپاس بی‌حد، وجودی را که منزه از تشبیه است. پروردگاری که به انسان کرامت بخشید و او را به زیور علم بیاراست. اینک که توفیق تهیه این رساله فراهم گردید، بر خود فرض می‌دانم از تمامی سرورانی که در این مدت به قلم و قدم یاری‌گرم بودند، تشکر نمایم و سپاس خالصانه خود را تقدیم دارم به اساتید راهنمایم دکتر سهیل واشقانی‌فراهانی و دکتر حسین صفری که در تمامی مراحل پژوهش با راهنمایی‌های سنجیده و ارزشمندشان مرا در آموختن یاری نمودند.

از داوران بزرگوار، دکتر یوسفعلی عابدینی و دکتر مولاداد نیکبخت به دلیل حضور و نظرات مفید و سازنده‌شان کمال تشکر و قدردانی را دارم.

همچنین از دوستانم، آقای محمدرضا جعفریان، فرشاد محمدرحیمی، محسن جواهریان، حامد قاسمی، محمد یونسی، سید محمود حجازی، محمود عظیمی‌یانچشمه، سمیه تاران، نسیمه علیپور، سارا جباری، نسترن فرهنگ، سمیه بازرگان، که در تمامی مراحل با راهنمایی‌ها و کمک‌ها و دلگرمی دادن‌های به موقع‌شان مرا یاری نمودند، بسیار سپاسگزارم.

در انتها صمیمانه‌ترین قدردانی خود را به خانواده‌ام تقدیم می‌کنم.

امیدوارم خداوند به من توفیق دهد تا در مسیر زندگی، پاسخگوی گوشه‌ای از محبت‌های این بزرگواران باشم.

چکیده

در این رساله، هدف، درک تأثیرات پیچش و چرخش تعادلی بر روی انتشار امواج آلفن در ساختار تاج خورشید (برای مثال: جت‌ها، پره‌های قطبی و حلقه‌ها) می‌باشد، که در لرزه‌شناسی تاج با استفاده از لوله‌ی شار باریک، الگوسازی می‌شود. ابزار مناسب در این بررسی، استفاده از معادلات مغناطوهیدرودینامیک ایده‌آل برای محیط خارج لوله‌ی شار و تقریب لوله شار باریک برای محیط داخل لوله شار می‌باشد. در فصل آغازین مروری بر ساختار خورشید و جو آن خواهیم داشت، همچنین معادلات مغناطوهیدرودینامیک را بیان می‌نماییم. در فصل دوم تقریب لوله‌ی شار باریک برای نوسانات متقارن محوری ($n=0$) مورد مطالعه قرار می‌گیرد. رابطه‌ی پاشندگی امواج پیچشی، سوسیسی و طولی برای پیچش و چرخش لوله‌ی شار باریک که در خلاء قرار دارد نشان داده می‌شود؛ به طوری که در این مورد، از اختلال فشار خارجی صرف نظر می‌شود. رابطه صریح سرعت فاز بر حسب عدد موج برای امواج طولی و پیچشی بدست آمده است که با منحنی‌های عددی مربوط به رابطه‌ی ضمنی مقایسه می‌شوند. همچنین سرعت‌های فاز امواج پیچشی و طولی برای مقادیر مختلف پیچش و دوران بر حسب عدد موج رسم می‌شود که با منحنی‌های عددی بدست آمده در توافق است. در فصل سوم اختلال فشار خارجی در نظر گرفته می‌شود. تقریب مرتبه دوم لوله شار باریک برای محیط داخل در حالی استفاده می‌شود که معادلات مغناطوهیدرودینامیک ایده‌آل برای محیط خارج مورد استفاده قرار می‌گیرد. با اعمال شرایط مرزی رابطه‌ی ضمنی پاشندگی بر حسب سرعت فاز و عدد موج را بدست می‌آوریم. بدین ترتیب رابطه‌ی صریح سرعت فاز امواج پیچشی را با حالتی که در آن از اختلال فشار خارجی صرف نظر شده، مقایسه می‌کنیم و تأثیرات بتای پلاسمای خارج، همراه با تأثیرات پیچش و چرخش تعادلی لوله شار را برای امواج پیچشی و طولی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. همچنین منحنی رابطه پاشندگی ضمنی و رابطه‌ی صریح سرعت فاز بر حسب عدد موج مقایسه می‌شوند. سازگاری منحنی‌ها، کارایی مطلوب رابطه‌های صریح بدست آمده در این رساله را نشان می‌دهد.

فهرست

۱ مقدمه

- ۱-۱ ساختار خورشید ۲
- ۱-۱-۱ ساختار داخل خورشید ۳
- ۲-۱-۱ ساختار جو خورشید ۴
- ۲-۱ مغناطوهیدرودینامیک ۷

۲ امواج پیچشی طولی موج بلند بدون حضور اختلال فشار خارجی

- ۱-۲ مقدمه ۱۱
- ۲-۲ الگو استوانه باریک ۱۲
- ۱-۲-۲ ساختار امواج در استوانه ۱۶
- ۲-۲-۲ نوسانات سوسیسی ۱۸
- ۳-۲-۲ نوسانات طولی ۱۸
- ۴-۲-۲ نوسانات پیچشی ۱۸
- ۳-۲ تقریب لوله شار باریک ۱۹
- ۱-۳-۲ توصیف الگو ۱۹
- ۲-۳-۲ لوله شار بدون پیچ خوردگی و چرخش ($J_0 = 0$ و $\Omega_0 = 0$) ۲۳
- ۳-۳-۲ لوله شار با در نظر گرفتن پیچش و صرف نظر کردن از چرخش ($J_0 \neq 0$ و $\Omega_0 = 0$) ۲۴
- ۴-۳-۲ لوله شار با در نظر گرفتن پیچش و چرخش همراه با اعمال حد بتای صفر ($J_0 \neq 0, \Omega_0 \neq 0$ و $\beta \rightarrow 0$) ۲۶

۲-۴ نتیجه‌گیری ۲۷

۳ امواج پیچشی طول موج بلند در حضور اختلال فشار خارجی

۱-۳ خطی‌سازی معادلات ۳۰

۲-۳ رابطه پاشندگی ۳۱

۱-۲-۳ لوله شار بدون پیچ‌خوردگی و چرخش ($J_0 = 0$ و $\Omega_0 = 0$) . . . ۳۳

۲-۲-۳ لوله شار با در نظر گرفتن پیچش و صرف‌نظر کردن از چرخش

($J_0 \neq 0$ و $\Omega_0 = 0$) ۳۷

۳-۲-۳ لوله شار با در نظر گرفتن پیچش و چرخش همراه با اعمال حد بتاهای

صفر ($\beta_e \rightarrow 0$ و $\beta \rightarrow 0$, $J_0 \neq 0$, $\Omega_0 \neq 0$) ۳۹

۳-۳ تحلیل و مقایسه نتایج ۴۱

۱-۳-۳ جمع‌بندی ۵۰

مراجع ۵۱

فصل اول

مقدمه

انرژی‌ای که از خورشید ساطع می‌شود، حیات را بر روی زمین امکان‌پذیر می‌سازد. خورشید در فاصله ۲۶۰۰۰ سال نوری از مرکز کهکشان قرار گرفته است و ۲۲۵ الی ۲۵۰ میلیون سال یک دور به دور مرکز کهکشان می‌چرخد و سرعت مداری آن به دور مرکز کهکشان برابر ۲۱۷ کیلومتر بر ثانیه می‌باشد. با توجه به محاسبات و تخمین‌های انجام شده ۴٫۵ میلیارد سال از عمر خورشید می‌گذرد. خورشید ستاره‌ای زرد رنگ و کوچک که ۹۸٫۸ درصد جرم منظومه شمسی را تشکیل می‌دهد و مواد تشکیل دهنده‌ی آن در فاز پلاسما می‌باشد. عناصر تشکیل دهنده‌ی خورشید عبارتند از: هیدروژن (۷۴ درصد جرم و ۹۲ درصد حجم خورشید)، هلیوم (۲۵ درصد جرم و ۷ درصد حجم خورشید) و عناصری مثل اکسیژن، کربن، گوگرد، سیلیکان و غیره، ۱ درصد بقیه جرم خورشید را می‌سازند. انرژی خورشید از طریق همجوشی هسته‌ای هیدروژن به هلیوم تولید می‌شود و در تعادل شبه هیدروستاتیک است. سایر مشخصات فیزیکی خورشید در زیر ارائه شده است:

○ قطر متوسط: $1.392 \times 10^9 \text{ m}$ (۱۰۹ برابر زمین)

○ شعاع در استوا: $6.955 \times 10^8 \text{ m}$

○ جرم: $1.9891 \times 10^{30} \text{ kg}$ (۳۳۲٫۹۴۶ برابر زمین)

○ چگالی متوسط: $1.409 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

○ شتاب گرانش در استوا: 274 m/s^2 (۲۷٫۹۴ برابر شتاب گرانش زمین)

○ سرعت فرار از سطح: 617.7 km/s (۵۵ برابر سرعت فرار از سطح زمین)

○ دمای تقریبی سطح: $4400 - 6400 \text{ K}$

○ دمای تقریبی تاج: $1 - 10 \text{ MK}$

○ دمای تقریبی هسته: $15 \times 10^6 \text{ K}$

○ درخشندگی^۱: $3,856 \times 10^{26} \text{ W}$

○ زمانی که نور طی می‌کند تا به زمین برسد: $8,31 \text{ min}$

○ فاصله از زمین: $1,496 \times 10^{11} \text{ m}$

خورشید نقش مهمی در راهنمایی ما در درک جهان هستی دارد زیرا ستاره ایست که به اندازه کافی به ما نزدیک است و ما می‌توانیم با مطالعه سطح آن به اطلاعاتی راجع به داخل آن پی‌ببریم. در واقع خورشید کلید درک رفتار و ساختار سایر ستارگان می‌باشد. ما در مورد خورشید اطلاعات زیادی داریم؛ از جمله سن، جرم، شعاع، درخشندگی و همچنین اطلاعاتی راجع به جو و داخل آن که در درک رفتار سایر ستارگان و نحوه‌ی تحول آن‌ها بسیار مهم است. بنابراین اخترفیزیک خورشیدی اطلاعات ارزشمندی در مورد ستارگان، سیستم سیارات، کهکشان‌ها و حتی خود جهان به ما می‌دهد.

۱-۱ ساختار خورشید

با تقریب بسیار خوبی می‌توان گفت خورشید کروی شکل در نظر گرفت. خورشید حول محور خود نوعی حرکت چرخش دورانی دیفرانسیلی^۲ دارد به طوری که دوره تناوب چرخش خورشید در استوایش برابر ۲۵ روز و در قطب‌هایش برابر با ۳۰ روز می‌باشد. علت بروز این پدیده هنوز ناشناخته مانده، اما برخی از دانشمندان معتقدند که این رفتار عجیب ریشه در میدان‌های مغناطیسی قوی حاکم بر خورشید دارد.

^۱ Luminosity

^۲ Differential rotation

۱-۱-۱ ساختار داخل خورشید

فاصله مرکز خورشید تا لبه‌ی سطح شیدسپهر^۱ را شعاع خورشید می‌نامند که برابر با 7×10^5 کیلومتر است. شیدسپهر لایه مرئی خورشید است که توسط چشم دیده می‌شود اما داخل آن را نمی‌توان مشاهده نمود زیرا برای تابش‌های الکترومغناطیسی کدر و غیر شفاف است. بنابراین می‌توان با بهره گرفتن از روش لرزه‌شناسی که برای شناخت ساختار درونی زمین به کار می‌رود برای شناخت ساختار داخلی خورشید از روش مشابه به نام لرزه‌شناسی خورشیدی^۲ استفاده کرد. در روش یاد شده از امواج فشاری فروصوتی^۳ که از داخل خورشید می‌آید، به طور غیر مستقیم با استفاده از مدل سازی کامپیوتری ساختار داخلی خورشید را بررسی می‌کنیم. با توجه به نتایج بدست آمده، خورشید دارای سه لایه داخلی هسته، ناحیه تابشی و ناحیه همرفت است که در شکل (۱-۱) مشاهده می‌کنیم.

هسته داغ ترین بخش با دمایی حدود ۱۵ میلیون درجه کلوین و چگالی 150×10^3 کیلوگرم بر متر مکعب است که تا ۲۵٪ شعاع خورشید گسترده شده و دارای فشاری معادل با ۱ میلیارد اتمسفر است. با توجه به چگالی زیاد انتظار می‌رود که هسته جامد باشد اما در حقیقت شامل گازهای داغ و یونیده از جنس پلاسما با دمای بسیار بالا می‌باشد.

به لایه‌ای که بعد از هسته و قبل از لایه‌ی همرفت قرار گرفته ناحیه تابش می‌گویند که از ۲۵٪ تا ۷٪ شعاع خورشید گسترده شده است و دمای آن کمی از دمای هسته پایین تر می‌باشد، همچنین چگالی این لایه از ۲۰۰۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در پایین این لایه به ۲۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب در بالای این لایه تغییر می‌کند.

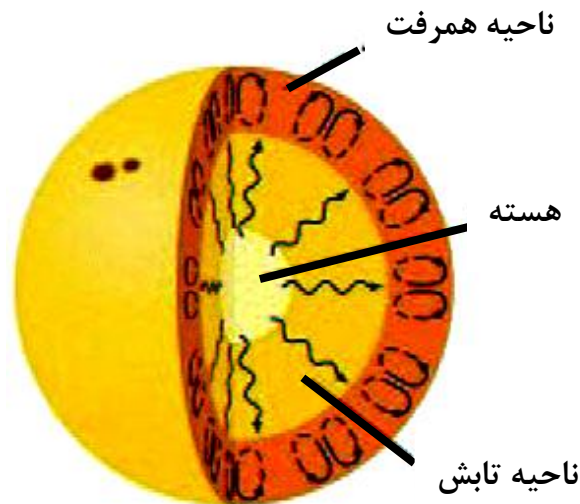
لایه همرفت از فضای ۷٪ شعاع خورشید تا سطح زیرین شیدسپهر کشیده شده است و شامل سلول‌های متلاطم همرفتی است که دانه^۴ نامیده می‌شوند. درون هر دانه گازهای داغ به سمت بالا صعود می‌کند و گازهای سرد به سمت پایین کشیده می‌شوند تا بار دیگر گرم شوند. دما در پایین این لایه دو میلیون درجه کلوین و در بالای آن به ۴۴۰۰ درجه کلوین می‌رسد، همچنین چگالی این ناحیه دو کیلوگرم بر متر مکعب است [۱].

^۱ Photosphere

^۲ Helioseismology

^۳ Infrasound

^۴ Granules



شکل ۱-۱: لایه‌های درون خورشید (هسته، ناحیه تابش و ناحیه همرفت).

۱-۱-۲ ساختار جو خورشید

هنگامی که خورشید گرفتگی روی می‌دهد جو خورشید را با چشم غیر مسلح می‌توان مشاهده نمود. جو خورشید در نواحی گسترده‌ای از ناحیه مرئی تا پرتو گاما از خود تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند و شامل پنج ناحیه اصلی است:

- شیدسپهر^۱ ● رنگین‌سپهر^۱ ● ناحیه گذار^۲ ● تاج^۳ ● بادهای خورشیدی^۴

سردترین لایه در جو خورشید شیدسپهر است که پایین‌ترین و چگال‌ترین قسمت جو خورشید است. به عبارت دیگر سطح مرئی خورشید را شیدسپهر می‌نامند. شیدسپهر دارای ضخامتی در حدود ۵۰۰ کیلومتر و دمای متوسط ۵۸۰۰ درجه کلوین می‌باشد. در مورد چگالی شیدسپهر می‌توان گفت که هر چند این لایه چگال‌ترین قسمت جو خورشید است، اما چگالی کمی در حدود 10^{-19} ذره در متر مکعب دارد [۱].

رنگین‌سپهر لایه‌ای است که بالای شیدسپهر قرار دارد و معمولاً به دلیل درخشندگی شیدسپهر، نامرئی می‌ماند و هنگام خورشیدگرفتگی به شکل هاله‌ای صورتی رنگ در اطراف خورشید دیده می‌شود. تغییرات دمایی در رنگین‌سپهر از ۱۰۰۰۰ درجه کلوین در پایین آن تا ۳۰۰۰۰ درجه کلوین

^۱ Chromosphere

^۲ Transition Region

^۳ Corona

^۴ Solar Wind

در بالای آن می‌باشد و ضخامتی در حدود ۲۰۰۰ کیلومتر دارد و چگالی آن بین 10^{16} تا 10^{17} ذره در متر مکعب است [۱].

لایه گذار یکی از لایه‌های باریک و نامنظم از جو خورشید است که تاج داغ خورشید را از رنگین‌سپهر جدا می‌کند. دما در لایه گذار ناگهان افزایش می‌یابد و از 20000 درجه کلوین در پایین این لایه به یک میلیون درجه کلوین در انتهای این لایه می‌رسد این افزایش دما بخاطر تغییر فازی است که در این ناحیه بخاطر یونیزه شدن اتم‌های هلیوم روی می‌دهد.

تاج لایه خارجی جو خورشید است که با چشم غیر مسلح در هنگام خورشید گرفتگی قابل رؤیت است. ابعادهای به مراتب از ابعاد خورشید بزرگتر است و شامل فرآیندهای بسیار متنوعی است. چگالی در پایین تاج برابر 10^{14} تا 10^{15} ذره در متر مکعب است که بسیار رقیق‌تر از چگالی جو زمین در نزدیکی آب‌های آزاد است و دمای آن حدود دو میلیون درجه کلوین می‌باشد که این مسئله به معمای تاج معروف است. گفته می‌شود که میدان‌های مغناطیسی عامل بوجود آورنده‌ی دمای بالای تاج هستند. موسوم است که تاج را به سه ناحیه تقسیم می‌کنند که این مناطق در دوره‌های مختلف چرخه‌ی خورشید اندازه‌ی متفاوتی دارند:

○ مناطق فعال ○ مناطق آرام ○ حفره‌های تاج^۱

در تاج خورشید می‌توان پدیده‌های جالبی را مشاهده نمود که برخی از آنها عبارتند از:

پره‌های قطبی تاج:

پره‌های قطبی^۲ جریان‌هایی بلند و باریک از گاز هستند که بطور عمودی از قطبین شمال و جنوب خورشید خارج می‌شوند. در سطح پایه‌ی آنها معمولاً نقاط روشنی دیده می‌شود که حامل میدان مغناطیسی‌اند. درون پره‌های قطبی خطوط میدان مغناطیسی از قطبین خارج شده و باز می‌باشند. ساختار نوک تیز و باریک پره‌های قطبی در اثر خروج بادهای خورشیدی از تاج به این شکل درآمد است.

^۱ Coronal Holes

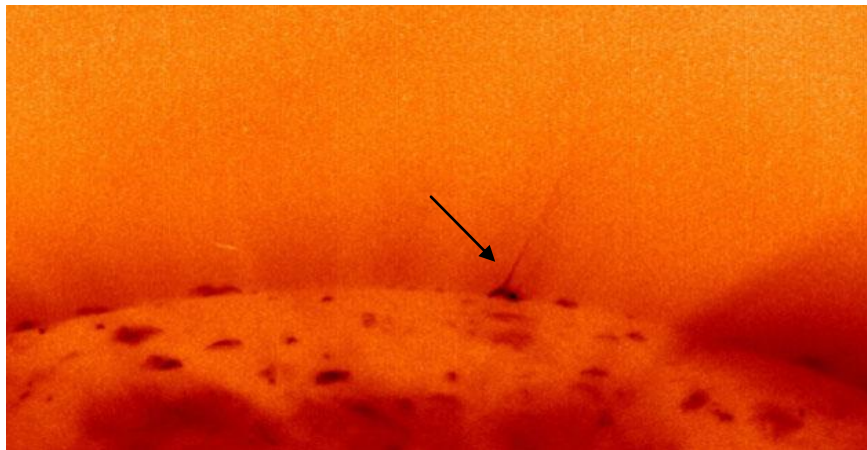
^۲ Polar Plumes

حلقه‌های تاج:

حلقه‌های تاج^۱ در اطراف لکه‌های خورشیدی و مناطق فعال تاج یافت می‌شوند. این حلقه‌ها دارای خطوط میدان مغناطیسی بسته هستند و مناطق فعال در سطح خورشید را به هم پیوند می‌دهند. بعضی از این حلقه‌ها چند روز تا چند هفته عمر می‌کنند اما اغلب آنها بعد از مدت کوتاهی از بین می‌روند. حلقه‌ها دارای گازهای چگال‌تری نسبت به تاج هستند. امروزه تعیین ساختار سه بعدی و دینامیک این حلقه‌ها یکی از رشته‌های مهم تحقیقاتی است.

جت‌های اشعه ایکس نرم:

اگر پلاسمای داغ در راستای خط میدان مغناطیسی باز شارش یابد جت اشعه ایکس نرم^۲ نامیده می‌شود که به شکل ساختار خطی و برخی مواقع انحنادار دیده می‌شوند (شکل ۱-۲).



شکل ۱-۲: جت‌های اشعه ایکس [۱۹].

سرعت‌های نوعی جت‌ها که بوسیله نظریه‌های ام‌چدی پیش‌بینی می‌شود در حدود سرعت آلفن می‌باشد. تلسکوپ اشعه ایکس که روی ماهواره هینوده^۳ نصب شده پیشرفت‌های زیادی را در مطالعه‌ی پدیده‌های تاجی با دمای بالا بخصوص جت‌ها به وجود آورده است.

^۱ Coronal Loops

^۲ Soft X-Ray jet

^۳ Hinode

این تلسکوپ توانسته ظهور ده جت را در هر ساعت در تاج خورشید با دمای میانگین شش مگا کلوین آشکار کند. با توجه به جت‌های آشکارسازی شده عمر نوعی آنها بین ۱۰۰ الی ۲۵۰۰ ثانیه می‌باشد. پهنای جت‌های اشعه ایکس در بازه $۱۰^۳ \times ۲$ الی $۱۰^۴ \times ۲$ کیلومتر و طول آنها در حدود $۱۰^۵$ کیلومتر است. همچنین سرعت شارش رو به بالای پلاسما در حدود ۲۰۰ الی ۸۰۰ کیلومتر بر ثانیه تخمین زده می‌شود [۱۹].

به علت دمای بالای تاج خورشید، ذرات باردار موجود در آن می‌توانند سرعت‌های بالایی بگیرند و به حد سرعت فرار از خورشید برسند. به این ذرات بارداری که از تاج خورشید خارج می‌گردند، باد خورشیدی می‌گویند. بادهای خورشیدی شامل ذرات سبک، الکترون‌ها و پروتون‌ها هستند که با سرعتی حدود ۳۰۰ الی ۸۰۰ کیلومتر بر ثانیه از خورشید خارج می‌شوند و به همین دلیل جریان‌های الکتریکی و میدان مغناطیسی بوجود می‌آورند که تمام منظومه شمسی را پر می‌کنند [۱].

۲-۱ مغناطوهیدرودینامیک

با استفاده از معادلات مغناطوهیدرودینامیک (ام‌اچ‌دی^۱) می‌توان پلاسما را به عنوان سیالی که از نظر الکتریکی رساناست و درون میدان مغناطیسی حرکت می‌کند، بررسی نمود. تئوری مغناطوهیدرودینامیک به توصیف پلاسمایی می‌پردازد که مسافت آزاد میانگین در برخورد بین الکترون‌ها و یون‌های آنها، طول و زمان مشخصه‌ی آن پلاسماها از نظر ماکروسکوپیکی بزرگ باشد. در استخراج این معادلات از معادلات الکترومغناطیس ماکسول به همراه معادلات مکانیک سیالات (نویر- استوکس^۲) استفاده می‌گردد [۲].

از ام‌اچ‌دی غالباً در بخش پلاسمای اختر فیزیکی استفاده می‌گردد. این تئوری از کمیت‌های چگالی متوسط، فشار متوسط و سرعت متوسط بهره می‌جوید و به صورت غیر نسبیتی به توصیف پدیده‌ها در پلاسما می‌پردازد به گونه‌ای که تمامی این کمیت‌ها از قوانین پایستگی جرم، تکانه و انرژی پیروی می‌کنند.

^۱ MHD

^۲ Navier - Stokes

بنابراین مغناطوهیدرودینامیک در حالت کلی شامل معادلات زیر می‌باشد:

$$\frac{D}{Dt} \rho = -\rho \vec{v} \cdot \vec{v} \quad , \quad \left(\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \right) \quad (1)$$

$$\rho \left(\frac{D}{Dt} \vec{v} \right) = -\vec{\nabla} P + \frac{1}{\mu} (\vec{v} \times \vec{B}) \times \vec{B} - \rho \vec{g} + \vec{F}_{\text{visc}} \quad (2)$$

$$\frac{\rho^\gamma}{\gamma - 1} \frac{D}{Dt} (P \rho^\gamma) = -L \quad (3)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \eta \vec{\nabla}^2 \vec{B} \quad (4)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (5)$$

که در معادلات بالا \vec{g} شتاب گرانشی، γ ضریب بی‌درو، \vec{F}_{visc} نیروی چسبندگی، \vec{B} میدان مغناطیسی و L تابع کاهش انرژی هستند. همچنین معادلات بالا بترتیب معرف قانون پایستگی جرم، معادله تکانه، معادله انرژی، معادله القاییدگی، شرط عدم تک قطبی مغناطیسی می‌باشند.

در رابطه‌ی (۴) جمله $\vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B})$ ، جمله القایی است که تمایل میدان مغناطیسی را به همراهی پلاسما نشان می‌دهد در صورتی که جمله دوم، $\eta \vec{\nabla}^2 \vec{B}$ ، جمله اهمی است که میزان افت میدان مغناطیسی را در اثر پخش‌شدگی^۱ مغناطیسی نشان می‌دهد ($\eta = \frac{1}{\mu \sigma}$) که σ رسانش الکتریکی و μ تراوایی مغناطیسی است). نسبت جمله القایی به جمله‌ی اهمی را عدد رینولد مغناطیسی^۲ R_m می‌نامند که عددی بدون بعد است و برابر است با:

$$R_m = \frac{l v}{\eta} \quad (6)$$

به طوری که l و v به ترتیب طول مشخصه تغییرات فضایی \vec{B} و سرعت پلاسما می‌باشند. بسته به این که این دو جمله چه مقداری بگیرند، دو حالت حدی خواهیم داشت:

○ اگر $R_m \rightarrow 0$ برای یک شاره ساکن از معادله (۴) داریم:

^۱ Diffusion

^۲ Magnetic Reynolds number

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \eta \nabla^2 \vec{B} \quad (7)$$

این مطلب به این معنی است که شکل اولیه میدان بعد از مدت زمان پخش $\tau = \frac{l\eta}{\mu}$ از میان می‌رود.

○ در حد $R_m \gg 1$ جمله القایی نقش مهمی را بازی می‌کند در نتیجه داریم:

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (8)$$

در این حالت رسانندگی پلاسما بسیار زیاد می‌باشد.

صورت دیگر معادلات مغناطوهیدرودینامیک حالتی می‌باشد که از نیروهای اتلافی و مقاومتی صرف نظر می‌کنیم و به معادلات ام‌اچ‌دی ایده‌آل^۱ زیر دست می‌یابیم. به دلیل شرایط فیزیکی حاکم بر تاج خورشید (چگالی بسیار کم و دمای بالا) از جمله‌های اتلافی^۲ و مقاومتی^۳ صرف نظر می‌کنیم.

$$\rho \left(\frac{D}{Dt} \vec{v} \right) = -\vec{\nabla} P - \rho \vec{g} + \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (10)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \vec{\nabla} \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (11)$$

$$\frac{D}{Dt} (P \rho^\gamma) = 0 \quad (12)$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad (13)$$

که بترتیب بیانگر معادلات تکانه، پیوستگی، القایی، انرژی و شرط عدم وجود تک قطبی مغناطیسی می‌باشند.

^۱ Ideal MHD
^۲ Dissipative
^۳ Resistive

پارامتر بتای پلاسما در تاج خورشید

ذرات باردار پلاسمای تاج (الکترونها و یونها) توسط نیروی لورنتس در یک مسیر مارپیچی چرخشی در امتداد خطوط میدان به حرکت در می‌آیند. تنها در مواقعی که انرژی جنبشی ذرات از انرژی میدان مغناطیسی بیشتر شود، ذرات از مدار خود خارج می‌شوند. این بدین معنی است که دما بالا بوده و میدان مغناطیسی ضعیف می‌باشد. پارامتر بتای پلاسما، پارامتری بحرانی برای تعیین این دو رژیم می‌باشد و با نسبت فشار گرمایی به فشار مغناطیسی تعریف می‌شود.

$$\beta = \frac{P_{th}}{P_{mag}} = \frac{C_s^2 \rho / \gamma}{B^2 / 2\mu} = \frac{2C_s^2}{\gamma C_A^2} \quad (14)$$

که $C_A = B / \sqrt{\mu\rho}$ و $C_s = \sqrt{\gamma P / \rho}$ بترتیب سرعت صوت و آلفن هستند.

فصل دوم

امواج پیچشی طول موج بلند بدون حضور اختلال فشار خارجی

۱-۲ مقدمه

ساختار پلاسمای استوانه‌ای، جاسازی شده در پلاسمایی با خصوصیات متفاوت یک الگو رایج برای چندین موضوع فیزیک نجومی، برای مثال در حلقه‌های خاص تاج، پره‌های قطبی و جت‌های تاج خورشید می‌باشد. در پلاسماهایی با بتای کم، از نوع تاج خورشید، وجوه پلاسمای استوانه‌ای سوسیسی، کینک، طولی^۱، بالونی و پیچشی^۲ هستند، این وجوه در مقالات ادوین و رابرتز^۳ (۱۹۸۳) [۴]؛ ناکاریاکف^۴ و ورویخت^۵ (۲۰۰۵) [۱۶] نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۰]. پالوده‌ترین شکل خصوصیات این وجوه در موردی که میدان مغناطیسی مستقیم، موازی با محور

^۱ Longitudinal

^۲ Torsional

^۳ Roberts

^۴ Nakariakov

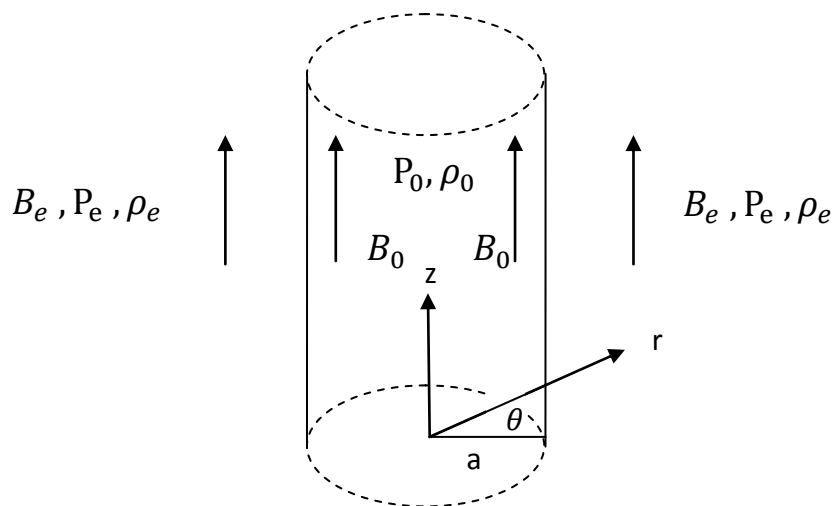
^۵ Verwichte

استوانه باشد دیده شده است. چهار وجه اول تراکم‌پذیر^۱ هستند (که با امواج مغناطواکوستیکی سریع آرام مطابقت می‌کنند)، در حالی که وجه پیچشی (همچنین با وجه چرخشی^۲ نیز شناخته می‌شود) بدرستی تنها اختلالات تراکم‌ناپذیر^۳ پلاسما هستند و با سرعت آلفن انتشار می‌یابند، بنابراین باید همانند امواج آلفن بررسی شوند [۱۱].

در مطالعات تاج خورشید، وجه پیچشی توجه زیادی را به خود جلب می‌نماید. از جمله تحقیقاتی که همچنان ادامه دارد بررسی نقش وجه پیچشی در گرمایش تاج و افزایش سرعت بادهای خورشیدی است که مبنی بر توانایی امواج پیچشی به نفوذ آسان در میان تاج خورشید می‌باشد [۱۳، ۱۸]. با وجود میل زیاد به مشاهده وجه پیچشی حضور آن در ساختار پلاسمای تاج خورشید دیده نشده است، چرا که مشکلات طبیعی از جمله نبود قدرت تفکیک پذیری مناسب در این آشکارسازی وجود دارد [۱۰].

۲-۲ الگو استوانه باریک

یک استوانه شامل میدان مغناطیسی یکنواخت B_0 در راستای z ، به شعاع a ، که با میدان مغناطیسی یکنواخت B_e در راستای z محصور شده را در نظر می‌گیریم. در شکل (۱-۲) فشار گاز و چگالی در داخل استوانه P_0 و ρ_0 ، و در بیرون استوانه P_e و ρ_e می‌باشد [۴].



شکل ۱-۲: وضعیت تعادلی استوانه مغناطیسی.

^۱ Compressible
^۲ Rotational
^۳ Incompressible

در نتیجه تعادل فشار داریم:

$$P_0 + \frac{B_0^2}{2\mu} = P_e + \frac{B_e^2}{2\mu} \quad (1)$$

که μ تراوایی مغناطیسی می باشد و آن را در دستگاه گوسی 4π در نظر می گیریم.

همچنین چگالی ρ_0 و ρ_e به صورت زیر با هم رابطه دارند:

$$\frac{\rho_e}{\rho_0} = \frac{2C_0^2 + \gamma V_A^2}{2C_e^2 + \gamma V_{Ae}^2} \quad (2)$$

که $C_0 = \left(\frac{\gamma P_0}{\rho_0}\right)^{1/2}$ و $V_A = \frac{B_0}{\sqrt{\mu\rho_0}}$ بترتیب سرعت صوت و آلفن در داخل استوانه و $C_e = \left(\frac{\gamma P_e}{\rho_e}\right)^{1/2}$ و $V_{Ae} = \frac{B_e}{\sqrt{\mu\rho_e}}$ سرعت های متناظر در بیرون استوانه می باشند.

با در نظر گرفتن معادلات امپدی ایدال و اثر دادن جملات اختلالی فشار، سرعت، میدان مغناطیسی و چگالی در آنها به روابط زیر می رسیم [۲۰، ۲۱]:

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_0 v_1) = 0 \quad (3)$$

$$P_1 = \gamma \frac{P_0}{\rho_0} \rho_1 \quad (4)$$

$$\rho_0 \frac{\partial v_1}{\partial t} = -C_0^2 \nabla \rho_1 + \frac{1}{\mu} (\nabla \times B_1) \times B_0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial B_1}{\partial t} = \nabla \times (v_0 \times B_0) \quad (6)$$

با بسط رابطه ی (۵) و گرفتن مشتق جزئی از آن داریم:

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial t^2} = C_0^2 \nabla (\Delta) + \left[-(\mathbb{N} - \Delta) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial v_1}{\partial z} - e_z \Delta \right) \right] \quad (7)$$

که در رابطه بالا $\Delta = \nabla \cdot v_1$ و $\mathbb{N} = \frac{\partial v_z}{\partial z}$

همچنین از تجزیه رابطه ی (۷) در راستای Z داریم: