

دانشکده علوم

# امواج مغناطو هیدرودینامیکی در حلقه های خمیده و پلاسمای بتای کم تاج خورشید

پایان نامه ی کارشناسی ارشد

سارا جباری

استاد راهنمای اول : دکتر سعدا... نصیری

استاد راهنمای دوم : دکتر حسین صفری

## بنام ایزد یکتا

از تو می‌پرسم اهورا به راستی مرا از آن آگاه فرما.  
کیست آن کسی که در روز نخست از آفرینش خویش پدر راستی گردید؟  
کیست آن کسی که به خورشید و ستاره راه سیر بنمود؟  
کیست آن کسی که از ماه گهی پر است و گهی تهی؟  
کیست نگهدار این زمین در پایین و سپهر در بالا که بسی نشیب فرود نیاید؟  
کیست ای مزدا آفریننده‌ی منش پاک، از تو می‌پرسم!

# قدردانی و تشکر

زیباترین منش آدمی محبت اوست و بهترین خوبی‌ها خرسندی مردمان است و بهترین ارمان آدمی آزادی است.

## کوروش کبیر

بسیار مایلیم تا مراتب قدردانی خود را از تمامی اساتید و دوستانی که در طول دوران تحصیل دانشگاهیم از راهنمایی‌ها و کمک‌های ایشان بهره‌مند بوده‌ام، بیان دارم. از آقایان پروفیسور سعدا... نصیری و دکتر حسین صفری به خاطر راهنمایی‌ها و آموزش فیزیک در تمام دوره‌ی کارشناسی ارشد به ویژه از این که قبول زحمت نموده‌اند و هدایت پایان نامه‌ی کارشناسی ارشد مرا به عهده گرفتند، کمال تشکر را دارم. بدون شک موفقیت علمی امروز و فردای خود را مرهون تلاش‌ها و پیگیری‌های مستمر ایشان می‌دانم.

از اساتید محترم آقایان دکتر سعید قنبری، دکتر علی نجفی، دکتر سیامک خادمی، دکتر محمد محمودی، دکتر ابراهیم فولادوند، دکتر آرش سروری، دکتر محمد خالد سعیدی، دکتر بهروز ملک الکلامی، دکتر کیومرث کرمی، دکتر ابراهیم کریمی و خانم دکتر فاطمه طاعتی به خاطر راهنمایی‌هایشان و زحماتی که برای اینجانب در تمامی دوره‌ی کارشناسی و کارشناسی ارشد متقبل شده‌اند، بسیار سپاسگذارم. قطعاً بدون حضور دوستانی که در تمامی مراحل با راهنمایی‌ها و کمک‌ها و دلگرمی دادن‌های به موقع‌شان مرا یاری نمودند، نمی‌توانستم کارهای تحقیقاتی خود را به انتها برسانم. در این جا لازم است از تمامی آن‌ها از جمله خانم‌ها: آزاده خشک‌رودی، معصومه موسوی، سمیه بلباسی، فاطمه افشار احمدی، طاهره روحی، سمانه رضوانی، خدیجه نجفی، زهرا حسنی و آقایان سینا نصیری، حامد علیزاده، انوشیروان رزخ، محمدرضا نیلفروشان، مارکوس آنتونیو آلبراسین و بقیه‌ی آن‌ها کمال قدردانی و تشکر را داشته باشم.

در طول دوران تحصیل خود، همواره از امکانات علمی دانشگاه تحصیلات تکمیلی در علوم پایه‌ی زنگان سود برده‌ام. لازم می‌دانم مراتب قدردانی خود را از آن دانشگاه و به ویژه پرفیسور ثبوتی اعلام دارم. ضروری است تا از مرکز فیزیک نظری (ICTP) در تریست ایتالیا به خاطر فراهم نمودن امکانات مالی سفر علمی دو هفته‌ای به آن مرکز برای شرکت در مدرسه‌ی نجوم تشکر نمایم. از دانشگاه یاگیلنین و دانشگاه ورشو لهستان به خاطر کمک مالی‌شان برای شرکت در کنفرانس بین المللی منجمین جوان (ICYA) در کراکف لهستان بسیار متشکرم. از گروه

ام‌اچ‌دی دانشگاه سنت‌اندرو و اسکاتلند و به ویژه از پروفیسور رابرتز به خاطر راهنمایی‌ها و ارسال مقالاتی که در دسترس اینجانب نبود کمال تشکر را دارم.

از خانم مهندس فرانک سقطچی، آقایان دکتر مجتبی صلوتی، مهندس مهدی جباری، مهندس روزبه سقطچی و آقای محسن جباری که بهره‌ی علمی و اخلاقی بسیاری از ایشان برده‌ام به طور بسیار ویژه تشکر می‌نمایم. در انتها صمیمانه‌ترین قدردانی خود را به خواهر و برادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

## چکیده

فصل آغازین این پایان نامه به شناخت خورشید و پدیده‌های داخل و اتمسفر آن اختصاص دارد. همچنین در این فصل ساختارهای مغناطیسی، دما، چگالی و پارامتر بتای پلاسمای تاج خورشید بررسی می‌شود. در فصل دوم مفاهیم و معادلات مغناطوهیدرودینامیک را بررسی نموده و محدودیت‌ها و مزیت‌های آن‌ها را در مطالعه‌ی تاج خورشید می‌سنجیم و در انتهای آن، سازوکارهای ارائه شده برای پدیده‌ی گرمایش تاج خورشید را بررسی می‌نماییم. در فصل سوم نگاهی به تاریخچه‌ی مطالعات و رصدهای خورشید، تاج و نوسانات آن خواهیم داشت. در فصل چهارم به مطالعه‌ی لوله‌های خمیده خواهیم پرداخت. در فصل پنجم به بررسی نسبت پرپود اول به دوم در نوسانات ایستاده‌ی مدهای آرام در حلقه‌های تاج خورشید خواهیم پرداخت. مک ایوان<sup>۱</sup> و همکاران (۲۰۰۶) در بررسی اثر لایه بندی طولی در مبحث لوله‌های بلند و باریک به یک معادله‌ی دیفرانسیل کلین-گوردون رسیده و آن را به روش تحلیلی حل نموده‌اند. در این پایان نامه ابتدا در ادامه کارهای ایشان توابع موج بدست آمده را بر حسب ارتفاع مقیاس‌های مختلف رسم نموده و سپس با در نظر گرفتن فرایند غیر آدیاباتیک برای لوله‌های غیر یکنواخت، معادله‌ی دیفرانسیل کلین-گوردون مربوطه را بدست آورده و تا مرتبه‌ی یک آن را به روش تحلیلی حل نمودیم. اثر مرتبه‌ی دوم نیز به روش عددی بدست آمده است. اثر ارتفاع مقیاس لوله بر تاج خورشید، فرکانس نوسانات و نسبت آن‌ها و میزان انحراف تابع موج از حالت سینوسی ساده در اثر حضور چگالی غیر یکنواخت و وجود اتلاف گرما بررسی شده است. در فصل ششم به تحلیل نتایج و مقایسه‌ی آن‌ها با نتایج به دست آمده توسط دیگران پرداخته شده است.

# فهرست

چکیده	.....	پنج
مقدمه	.....	ده

## ۱ خورشید از درون تا جو

۱.۱ ساختار داخل خورشید	.....	۳
۱.۱.۱ هسته	.....	۳
۲.۱.۱ ناحیه‌ی تابش	.....	۴
۳.۱.۱ لایه‌ی تکوکالین	.....	۵
۴.۱.۱ ناحیه‌ی همرفت	.....	۶
۲.۱ جو خورشید	.....	۷
۱.۲.۱ شیدسپهر	.....	۸
۲.۲.۱ رنگین سپهر	.....	۱۴
۳.۲.۱ ناحیه‌ی گذار	.....	۱۵

۱۷	.....	۴.۲.۱	تاج
۲۷	.....	۵.۲.۱	بادهای خورشیدی
۲۹	.....	۶.۲.۱	هورسپهر

## ۲ معادلات مغناطوهیدرودینامیکی

۳۰	.....	۱.۲	مغناطوهیدرودینامیک
۳۲	.....	۱.۱.۲	محدودیت‌های مغناطوهیدرودینامیک
۳۲	.....	۲.۱.۲	دلایل استفاده از تئوری مغناطوهیدرودینامیک در توصیف تاج
۳۳	.....	۳.۱.۲	کاربردهای مغناطوهیدرودینامیک
۳۴	.....	۴.۱.۲	معادلات مغناطوهیدرودینامیک
۳۸	.....	۲.۲	تعادل مغناطواستاتیکی در لوله‌ی شار قائم
۳۹	.....	۳.۲	خطی کردن معادلات مغناطوهیدرودینامیک
۴۱	.....	۴.۲	امواج مغناطوهیدرودینامیکی
۴۲	.....	۱.۴.۲	امواج آلفون
۴۳	.....	۲.۴.۲	امواج مغناطوآکوستیک آرام
۴۳	.....	۳.۴.۲	امواج مغناطوآکوستیک تند
۴۳	.....	۴.۴.۲	امواج در پلاسمای ناهمگن
۴۵	.....	۵.۲	مکانیزم‌های ممکن برای گرمایش تاج

### ۳ مروری بر مشاهدات و رصد نوسانات تاج خورشید

۴۹	پیشینه تاریخی رصد خورشید تا به امروز	۱.۳
۵۶	لرزه‌شناسی امواج مغناطوهیدرودینامیکی	۲.۳
۶۰	تاریخچه‌ی مطالعات نوسانات تاج	۳.۳
۶۱	مشاهده نوسان‌های تند مغناطوآکوستیک	۴.۳
۶۱	مشاهده‌ی نوسان‌های وجه کینک	۱.۴.۳
۶۲	تصویربرداری از نوسان‌های وجه سوسیسی	۲.۴.۳
۶۳	مشاهده نوسان‌های آرام مغناطوآکوستیک	۵.۳

### ۴ اثر خمیدگی لوله‌ها در نوسانات تاجی

۶۷	مقدمه	۱.۴
۶۸	تاریخچه	۲.۴
۶۹	بررسی مساله‌ی لوله‌های خمیده	۳.۴
۶۹	توصیف مدل	۱.۳.۴
۷۰	معادلات حاکم	۲.۳.۴
۷۳	مدهای نشتی	۳.۳.۴

### ۵ اثر فرایند غیرآدیاباتیک در فرکانس نوسانات لوله‌های تاج

۷۴	توصیف مدل و معادله‌ی موج در حالت غیرآدیاباتیک	۱.۵
۷۶	حالت تعادل	۱.۱.۵



۷۷	خطی سازی معادلات	۲.۱.۵
۷۹	تقارن	۳.۱.۵
۸۰	اثر استرچینگ (stretching)	۴.۱.۵
۸۲	تغییر متغیر	۵.۱.۵
۸۵	حل معادله‌ی دیفرانسیل حالت غیرآدیاباتیکی	۲.۵
۸۶	اختلال مرتبه‌ی اول و دوم	۱.۲.۵
۹۱	اختلال مرتبه‌ی دوم	۲.۲.۵

## ۶ تحلیل و مقایسه‌ی نتایج

۹۴	تحلیل توابع موج حالت آدیاباتیکی	۱.۶
۹۵	نتایج تصحیح مرتبه‌ی اول	۲.۶
۹۷	فرکانس و تابع موج مرتبه‌ی اول اختلال	۱.۲.۶
۹۷	تفسیر و مقایسه	۲.۲.۶
۱۰۰	نتایج تصحیح مرتبه‌ی دوم	۳.۶
۱۰۱	فرکانس و تابع موج مرتبه‌ی دوم	۱.۳.۶
۱۰۳	تفسیر و مقایسه‌ی نتایج	۲.۳.۶
۱۰۶	نسبت $P_1/P_2$ در حالت غیرآدیاباتیکی	۴.۶
۱۰۷	جمع بندی	۵.۶
۱۰۸	مراجع	

## مقدمه

اکنون حدود شش دهه از کشف دمای بسیار زیاد تاج خورشید می‌گذرد. از آن زمان به امروز نظریه‌ها و مدل‌های بسیاری جهت توجیه این پدیده‌ی شگف انگیز ارائه شده است. البته مشاهدات دهه‌ی گذشته توسط ماهواره‌ی تریس که توسط ناکاریاکف و همکارانش مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند، درستی نظریه‌ی مغناطوهیدرودینامیک را بیش از سایرین تایید کرده است. بنا به این نظریه که در فصل دوم توضیح داده خواهد شد، حضور امواج ام‌چ دی<sup>۲</sup> و میرایی به عنوان عامل دمای بسیار بالا در پلاسمای تاج معرفی می‌شود. البته لازم به یادآوری است که مفاهیم بنیادی این نظریه از سال‌ها قبل توسط برخی از دانشمندان علم نجوم مانند یانسن<sup>۳</sup>، هولوگ<sup>۴</sup>، ونتزل<sup>۵</sup>، ویلسون<sup>۶</sup>، ادوین<sup>۷</sup>، رابرتز<sup>۸</sup>، داویلا<sup>۹</sup>، اشتایلفسن<sup>۱۰</sup> و آفمن<sup>۱۱</sup> مطرح و گسترش داده شده است. امروزه دانشمندان در تلاش اند تا با بهبود مدل‌های موجود تاج خورشید بر مبنای این نظریه پدیده‌های مشاهده شده را توجیه نمایند. اخیراً مک ایوان و همکارانش (۲۰۰۶) [۶]، مدلی ارائه داده اند که در حالت آدیاباتیک برای لوله‌هایی با لایه بندی طولی، پارامتر بتای پلاسمای غیر صفر و دمایی که به طور خطی با ارتفاع لوله تغییر می‌کند؛ نسبت پریود اول به دوم را به دست می‌دهد. آن چه که در این پایان نامه انجام شده است تکمیل و توسعه‌ی کار آن‌ها برای حالت غیر آدیاباتیک می‌باشد.

---

<sup>۲</sup> MHD

<sup>۳</sup> Ionson

<sup>۴</sup> Hollweg

<sup>۵</sup> Wentzel

<sup>۶</sup> Wilson

<sup>۷</sup> Edwin

<sup>۸</sup> Roberts

<sup>۹</sup> Davila

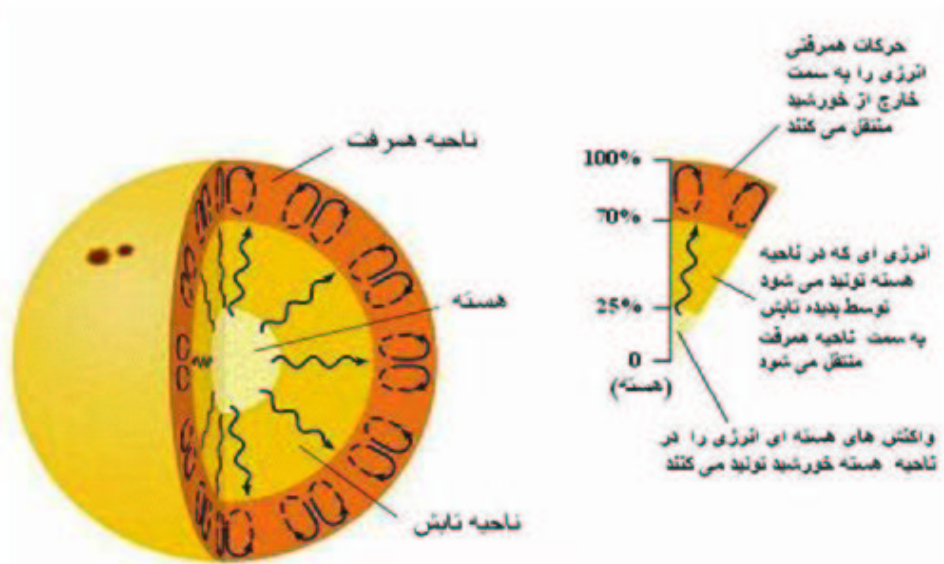
<sup>۱۰</sup> Steinlofson

<sup>۱۱</sup> Ofman

# فصل اول

## خورشید از درون تا جو

خورشید ستاره‌ای زرد رنگ و کوچک است که 99/8 درصد جرم منظومه شمسی را تشکیل داده است . نزدیک‌ترین ستاره به زمین در فاصله‌ی  $1/496 \times 10^{11}$  متری آن قرار گرفته است و به این ترتیب نور آن پس از حدود 8/31 دقیقه به ما خواهد رسید. با تقریب بسیار خوبی می‌توان گفت که خورشید کروی شکل است به طوری که شعاع آن در محل استوا فقط ده کیلومتر بیش‌تر از شعاع آن در قطب می‌باشد. به علت دمای بالای خورشید مواد تشکیل دهنده‌ی آن در حالت پلاسما قرار دارند. پلاسما گازی است که از یون‌ها و ذرات باردار تشکیل شده است. خورشید حول محورش نوعی حرکت چرخش دورانی دارد به طوری که استوایش سریع‌تر از قطب‌هایش می‌چرخد. اثر نیروی گریز از مرکزی که در اثر چرخش دورانی خورشید به وجود می‌آید هجده میلیون بار ضعیف‌تر از اثر نیروی گرانش بر روی سطح استوای خورشید می‌باشد به همین دلیل در اثر این حرکت، جرم خورشید به خارج از خورشید پرتاب نمی‌شود. اثرات جذر و مدی سایر سیارات ( به علت جرم بسیار ناچیزشان در مقایسه با جرم خورشید ) تاثیر چندانی بر تغییر شکل خورشید ندارد. خورشید مرز مشخصی برای سطحش ندارد. در قسمت‌های بیرونی خورشید، چگالی گاز به صورت نمایی از داخل به سمت خارج افت می‌کند اما بخش‌های داخلی خورشید را می‌توان به خوبی متمایز کرد.



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

فاصله مرکز خورشید تا لبه سطح شیدسپهر<sup>۱</sup> را شعاع خورشید می‌نامند که برابر با 700000 کیلومتر است. به طور خلاصه شیدسپهر لایه‌ی مرئی خورشید است که توسط چشم دیده می‌شود اما داخل خورشید را نمی‌توان به طور مستقیم مشاهده نمود زیرا داخل خورشید برای تابش‌های الکترومغناطیسی کدر و غیر شفاف است. همانطور که از امواجی که در زمین لرزه‌ها تولید می‌شود برای شناخت ساختار درونی زمین بهره گرفته می‌شود برای شناخت ساختار داخلی خورشید نیز از روشی مشابه به نام لرزه‌شناسی خورشیدی<sup>۲</sup> استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از امواج فشاری فروسوتی<sup>۳</sup> که از داخل خورشید می‌آیند به طور غیر مستقیم ساختار داخلی خورشید را با استفاده از مدل‌سازی‌های کامپیوتری به صورت نظری مطالعه می‌کنند. طبق نتایج بدست آمده درون خورشید از سه لایه اصلی تشکیل یافته است: هسته، ناحیه تابش و ناحیه همرفت (شکل ۱.۱). کل مسئولیت تولید انرژی بر عهده‌ی هسته‌ی خورشید است و سایر بخش‌های داخل خورشید توسط انرژی‌ای که از داخل هسته به سمت بیرون می‌آید گرم می‌شوند. تمام انرژی‌ای که در هسته تولید می‌شود باید از بین لایه‌های مختلف عبور کند تا به شیدسپهر برسد و سپس به صورت نور و حرارت و ذرات پرنرژی بادهای خورشیدی از خورشید خارج گردد.

<sup>۱</sup> photosphere

<sup>۲</sup> helioseismology

<sup>۳</sup> infrasound

## ۱.۱ ساختار داخل خورشید

### ۱.۱.۱ هسته

هسته خورشید داغ‌ترین بخش خورشید است و در فاصله‌ی مرکز خورشید تا  $0/25$  شعاع خورشید گسترده شده است و چهل درصد از جرم خورشید را در ده درصد حجم خورشید دربر دارد. چگالی آن در حدود 150000 کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد (که این چگالی 150 برابر چگالی آب بر روی زمین است!)<sup>۴</sup> و دمایی در حدود پانزده میلیون درجه‌ی کلون و فشار یک میلیارد اتمسفر دارد. ناظران اولیه می‌پنداشتند که فرایند تولید انرژی در خورشید به صورت واکنش‌های شیمیایی (همانند واکنش سوختن زغال) می‌باشد اما با محاسبه‌ی سرانگشتی مشخص می‌شود که مقدار انرژی که از طریق واکنش‌های فسیلی تولید می‌شود بسیار کمتر از مقداری است که بنا به شواهد بدست آمده، خورشید در طول عمر  $4/5$  میلیارد ساله‌اش تولید کرده است. امروزه با شمارش تعداد نوترینوهایی که از خورشید به سطح زمین می‌رسند (در طی فرایندهای آشکارسازی بسیار سخت و پیچیده)<sup>۵</sup> به این نتیجه رسیده‌اند که در هسته خورشید باید فرایند هم جوشی هسته‌ای رخ بدهد تا خورشید بتواند جوابگوی این مقدار عظیم انرژی خروجی باشد. واکنشی بسیار شبیه به آنچه در بمب اتمی رخ می‌دهد؛ با این تفاوت که این واکنش‌ها در خورشید مهار شده‌اند اما ما هنوز بر روی زمین نتوانسته‌ایم فرایند هم جوشی هسته‌ای را به صورت کنترل شده ایجاد کنیم. همانطور که ذکر گشت در هسته دما پانزده میلیون درجه‌ی کلون و فشار معادل با یک میلیارد اتمسفر می‌باشد. در چنین محیطی چهار هسته هیدروژن باهم ترکیب می‌شوند و یک هسته هلیوم ایجاد می‌کنند این فرآیند شدیداً انرژی زااست و به این ترتیب جرقه‌ی واکنش هسته‌ای زده می‌شود. در طی این فرآیند

---

<sup>۴</sup> با این مقدار بالای چگالی، انتظار داریم که هسته‌ی خورشید در فاز جامد باشد اما در حقیقت شامل گازهای داغ و یونیده از جنس پلاسما با دمای بسیار بالا می‌باشد

<sup>۵</sup> زیرا نوترینو ذره‌ای است که به سختی واکنش می‌دهد و به اصطلاح گیر می‌افتد. برای ایستادن یک نوترینو باید آن را از دیواری به ضخامت یک سال نوری عبور دهیم!

هفت درصد از جرم هسته هلیوم ناپدید می‌شود اما در واقع این مقدار جرم به انرژی‌ای معادل با  $0/43 \times 10^{-11} J$  تبدیل می‌شود. این مقدار انرژی بسیار کم است اما چون در هر ثانیه در حدود  $3/6 \times 10^{38} J$  پروتون (هسته هیدروژن) باهم ترکیب می‌شوند مقدار عظیمی انرژی آزاد می‌شود. چنین واکنش هسته‌ای چرخه‌ی پروتون پروتون<sup>۶</sup> نامیده و اصطلاحاً به آن هیدروژن سوزی می‌گویند (شکل ۱.۲).

## ۲.۱.۱ ناحیه‌ی تابش

همانطور که ذکر شد خورشید و دیگر ستارگان انرژی‌شان را در داخلی‌ترین بخش خود یعنی هسته تولید می‌کنند اما این انرژی باید به طرف بیرون حرکت کند و بر روی سطح برسد. چنانچه این شارش خروجی ناگهان قطع شود سطح خورشید به تدریج تیره و سرد خواهد شد و شروع به منقبض شدن می‌نماید. بنابراین ستارگان تنها به شرطی می‌توانند وجود داشته باشند و پایدار بمانند که انرژی از مرکزشان به سطح منتقل شود.

انرژی درون ستارگان می‌تواند توسط سه پدیده آشنای رسانش، تابش و همرفت جابجا گردد. اما از آن جایی که پدیده رسانش به تماس نزدیک بین ملکول‌ها نیازمند می‌باشد و فاز ماده در اکثر ستارگان گازی است عملاً سهمی در انتقال انرژی ندارد. اخترشناسان معتقدند در مورد ستاره‌ای همچون خورشید مؤثرترین روش انتقال انرژی به بیرون از هسته به شکل پدیده تابش خواهد بود. به این لایه که بعد از هسته و قبل از لایه همرفت قرار گرفته «ناحیه تابش» می‌گویند که از  $0/25$  تا  $0/7$  شعاع خورشید گسترده شده است و دمای آن کمی از دمای هسته پایین‌تر است. به علت پایین‌تر بودن دما تعدادی از اتم‌ها دست نخورده باقی می‌مانند. این اتم‌ها می‌توانند انرژی را جذب کنند و برای مدتی در خود ذخیره نمایند و سپس آن را به شکل تابشی جدید گسیل نمایند. به این ترتیب انرژی تولید شده در هسته خورشید توسط فرآیندهای متعدد جذب و گسیل مجدد در ناحیه‌ی تابش به طریقی کاملاً کاتوره‌ای پخش می‌گردد. یعنی فوتونی که هسته را ترک می‌کند به خط مستقیم به سطح خورشید نمی‌رسد بلکه دستخوش برخوردها، پراکنده‌گی‌ها، جذب و گسیل‌های متعدد می‌شود و در واقع انرژی این گونه از اتمی به اتم دیگر در ناحیه تابش منتقل می‌شود. به عنوان نمونه اگر یک فوتون را که در مرکز خورشید تولید شده

<sup>۶</sup> P.P.Chain

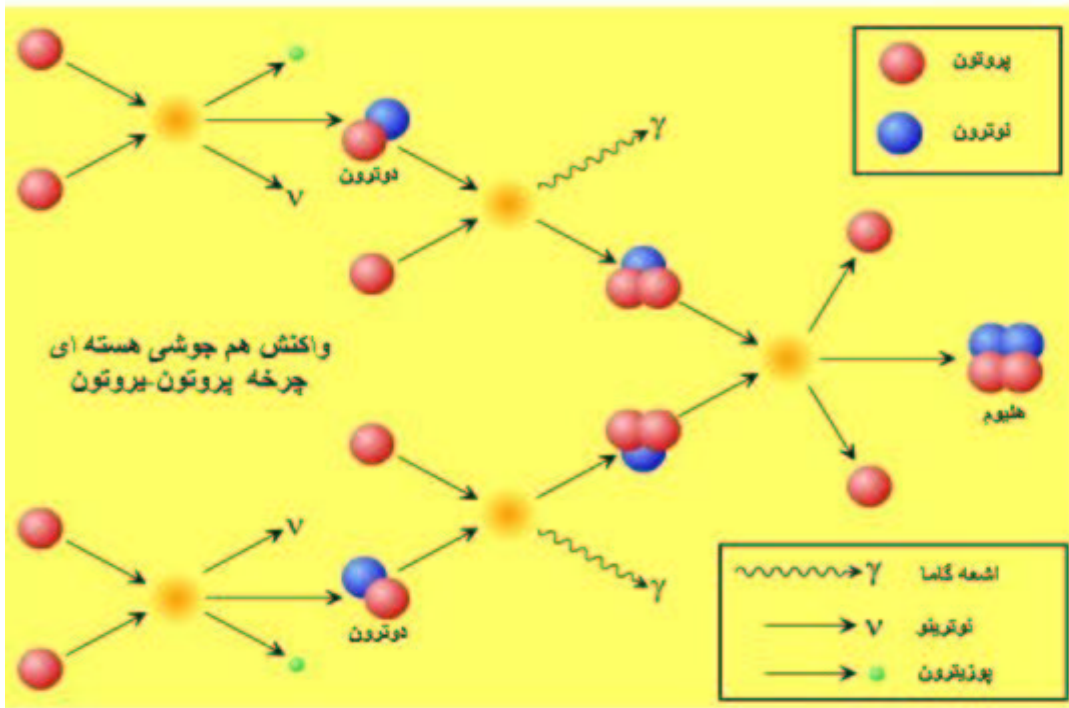
را بتوانیم در میان واکنش‌های تصادفی بی شمار دنبال کنیم خواهیم دید که بیش از یک میلیون سال طول می‌کشد تا نتایج واکنش اولیه‌ی آن به سطح خورشید برسد و به جهان خارج بتابد. چگالی لایه‌ی مذکور از 20000 کیلوگرم بر متر مکعب در پایین این لایه به 200 کیلوگرم بر متر مکعب در بالای این لایه تغییر می‌کند. انرژی شارش شده توسط پدیده‌ی تابش به مقدار مقاومتی که فوتون‌ها در هنگام عبور گاز دارند بستگی دارد. یعنی هر چه دما و چگالی در گازی کمتر باشد آن گاز کدروی بیشتری دارد و فوتون‌ها به سختی در آن جذب و گسیل می‌شوند و تابش در آن گاز به آسانی صورت نمی‌گیرد. انرژی که مرکز ستاره به طرف خارج حرکت می‌کند نخست از میان گازهای داغ‌تر و درونی‌تر عبور می‌کند و به دلیل گرم بودن محیط شفاف‌تر به نظر می‌رسد و انرژی به صورت تابش منتقل می‌شود. اما هر چه به بخش‌های خارجی ستاره نزدیک می‌شویم محیط سردتر و کم چگال‌تر می‌شود تا زمانی که گاز شروع به متلاطم شدن می‌کند و دیگر تابش نمی‌تواند انرژی را منتقل کند در این هنگام سومین پدیده انتقال حرارت یعنی همرفت وارد عمل می‌شود.

### ۳.۱.۱ لایه‌ی تکوکلاین

لایه تکوکلاین<sup>۷</sup> یک لایه گذار است که نواحی همرفت و تابش را از هم جدا می‌سازد. ناحیه همرفت همانند یک سیال با چرخش دیفرانسیلی به گونه‌ای می‌چرخد که قطب‌ها آهسته‌تر و استوا سریع‌تر می‌چرخد. اما ناحیه تابش همانند یک جسم صلب می‌چرخد. گفته می‌شود این تغییر ناگهانی در روش انتقال انرژی و نوع حرکت در ناحیه تکوکلاین می‌تواند منشاء شکل‌گیری میدان مغناطیسی در خورشید باشد. نتایج محاسباتی نشان می‌دهند که وجود این لایه در عرض‌های جغرافیایی کم در انتهای لایه همرفت قطعی است اما در عرض‌های جغرافیایی بالا با قطعیت کم‌تری دیده می‌شوند. هندسه پهنای این لایه در مدل‌های تئوری نقش مهمی را در مدل دیناموی خورشیدی و پیچاندن و تبدیل میدان ضعیف قطبی به میدان استوایی دارد.

---

tachocline <sup>۷</sup>



شکل ۱-۲: فرایند هم جوشی هسته‌ای در هسته‌ی خورشید (زنجیره‌ی پروتون-پروتون)

#### ۴.۱.۱ ناحیه‌ی همرفت

در ناحیه همرفت همان طور که از نامش پیداست فرایند همرفت آغاز بکار می‌کند. این لایه از فضای ۰/۷ شعاع خورشید تا سطح زیرین شیدسپهر کشیده شده است و شامل سلول‌های متلاطم همرفتی است که گرانپول<sup>۸</sup> نامیده می‌شود. درون هر گرانپول گازهای داغ به سمت بالا صعود می‌کنند و گازهای سرد به سمت پایین کشیده می‌شوند تا بار دیگر گرم شوند. دما در پایین این لایه ۲ میلیون درجه کلوین است که در بالای این لایه به ۵۷۰۰ درجه کلوین می‌رسد. چگالی این ناحیه برابر با ۲ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.

در این لایه از خورشید انرژی در دانه‌های بزرگی از گاز به ابعاد چند صد کیلومتر در جهت شعاعی شروع به منتقل شدن می‌کند و همین طور که به سطح خورشید نزدیک می‌شوند؛ کوچک‌تر می‌گردند و بدین سان تمایل به مخلوط کردن گاز دارند. هرگاه در نور سفید و با دقت کافی از سطح خورشید عکس گرفته شود در سطح آن گرانپول‌ها را می‌توان دید. نقاط روشن در واقع ستون‌های گاز داغی هستند که در حال صعود می‌باشند و مرزهای

<sup>۸</sup> Granules



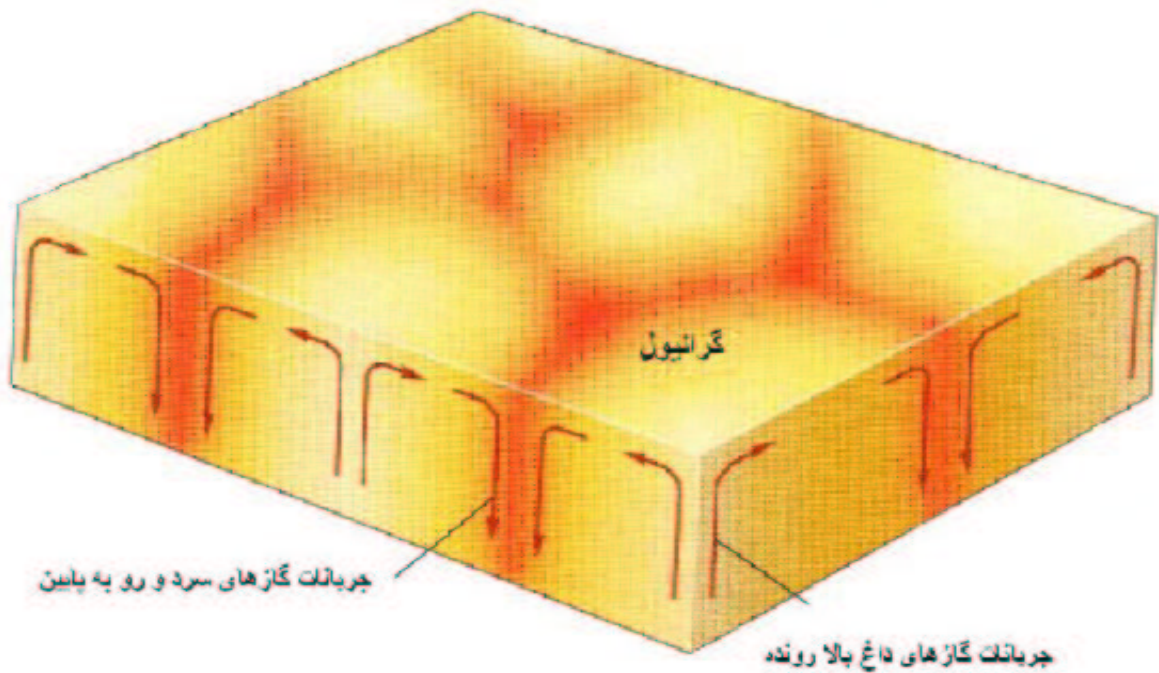
تیره گازهای سردی هستند که به پایین کشیده می‌شوند تا دوباره گرم شوند شکل (۳.۱). به این ترتیب فوتونی که در مرکز خورشید ایجاد شده بود تحت فرایندهای مختلف به سطح خورشید می‌رسد و راه خویش را جهت فرار از خورشید همچنان ادامه می‌دهد. همان گونه که ذکر گشت دما و چگالی در مرکز خورشید بسیار بالا و در حدود پانزده میلیون درجه ی کلوین و 150 هزار کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد اما هر چه از مرکز به سمت سطح خورشید پیش می‌رویم دما و چگالی خورشید کاهش یافته و حدوداً به 6000 درجه ی کلوین و 10 کیلوگرم بر متر مکعب می‌رسد شکل (۴.۱).

## ۲.۱ جو خورشید

در طی زمانی که خورشید گرفتگی کامل روی می‌دهد جو خورشید را با چشم غیر مسلح می‌توان رؤیت نمود. جو خورشید در نواحی گسترده‌ای از ناحیه ی مرئی تا پرتوهای گاما از خود تابش الکترومغناطیسی گسیل می‌کند و شامل ۶ ناحیه اصلی است: (شیدسپهر، رنگین سپهر، ناحیه ی گذار، تاج، بادهای خورشیدی و هورسپهر) سردترین لایه در اتمسفر خورشید شیدسپهر<sup>۹</sup> است که در انتهای بالای شیدسپهر دما به 4000 درجه ی کلوین افت می‌کند و به اندازه کافی سرد است که مولکول‌هایی چون مونوکسید کربن و حتی آب در آن به کمک خطوط طیفی جذبی‌شان آشکار گردند. در بالای این ناحیه رنگین سپهر قرار دارد که 2000 کیلومتر ضخامت دارد. و در هنگام خورشید گرفتگی به شکل هاله‌ای صورتی رنگ در اطراف خورشید دیده می‌شود به همین دلیل آن را رنگین سپهر نامیده‌اند. دما در رنگین سپهر بتدریج افزایش می‌یابد و در انتهای این لایه به 100000 درجه کلوین می‌رسد. پس از این لایه، لایه ی گذار قرار دارد که دما در آن ناگهان افزایش می‌یابد و از 100000 درجه در پایین این لایه به نزدیک یک میلیون درجه کلوین در انتهای این لایه می‌رسد. این افزایش دما به خاطر تغییر فازی است که در این ناحیه به خاطر یونیزه شدن اتم‌های هلیوم روی می‌دهد.

---

<sup>۹</sup> photosphere



شکل ۱-۳: ساختار دانه‌ای موجود در سطح شیدسپهر

لایه‌ی گذار ابعاد دقیقی ندارد و از روی زمین قابل رؤیت نیست بلکه فقط از طریق تلسکوپ‌های طیف‌نگاری که در خارج از جو زمین قرار دارند، در بخشی از طیف فرابنفش دور قابل آشکارسازی است. لایه‌ی بعدی تاج است که ابعادهای آن به مراتب از ابعاد خود خورشید بزرگ‌تر است و شامل فرایندهای بسیار متنوعی است. چگالی در پایین تاج برابر  $10^{14}$  تا  $10^{16}$  ذره در متر مکعب است که بسیار رقیق‌تر از چگالی جو زمین در نزدیکی آب‌های آزاد می‌باشد و دمای آن چندین میلیون درجه کلوین است که این مسئله به معمای تاج معروف است. تاج به آهستگی به بخش بعدی جو خورشید یعنی باد خورشیدی می‌پیوندد و این بادهای خورشیدی نیز به نوبه خود از میان کره هورسپهر عبور می‌کنند. محدوده‌ی هورسپهر از بیست برابر شعاع خورشید یعنی  $0.1 Au$  آغاز شده و تا بیرون منظومه شمسی ادامه می‌یابد و جابجایی را به شعاع  $50 Au$  می‌سازد. در بخش‌های زیر به معرفی جداگانه هر یک از این بخش‌ها می‌پردازیم:

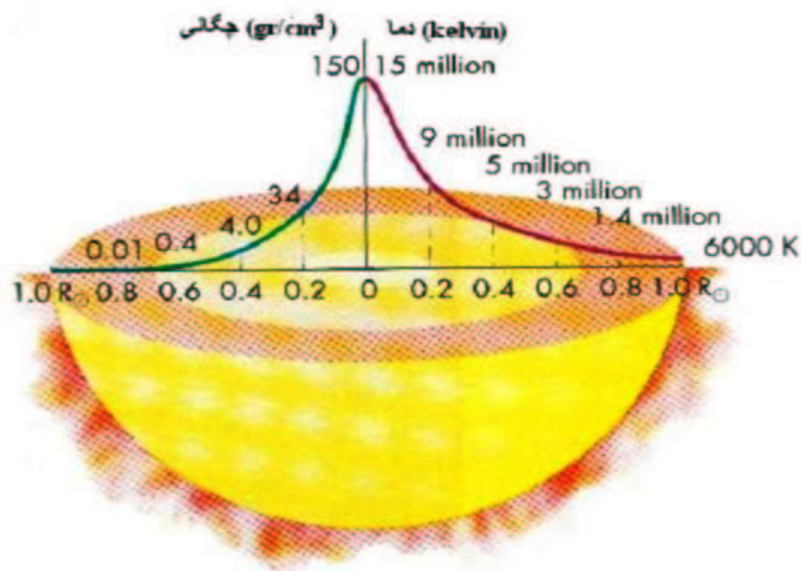
### ۱.۲.۱ شیدسپهر

پایین‌ترین و چگال‌ترین قسمت جو خورشید می‌باشد. به عبارت دیگر سطح مرئی خورشید را شیدسپهر می‌نامند. زیرا نور خورشیدی که ما رؤیت می‌کنیم از این ناحیه گسیل می‌گردد. در واقع 99/9 درصد انرژی که در داخل

خورشید تولید می‌شود از این ناحیه گسیل می‌گردد که اغلب آن حدود 5000 آنگستروم در ناحیه‌ی نور مرئی می‌باشد. در طیف خورشید بیش از 20000 خط تیره یا خطوط جذبی فرانیهوفر وجود دارد که توسط آن‌ها ترکیبات شیمیایی عناصر دما و فشار شیدسپهر را می‌توان اندازه گرفت. در واقع عنصر هلیوم نیز اولین بار در سال 1896 در حین تحلیل طیف خورشید توسط ویلیام رامسی<sup>۱۰</sup> کشف گردید. او طرحی را در طیف خورشید دید که با هیچ یک از گازهای از پیش شناخته شده بر روی زمین تطابق نداشت. او نام این گاز جدید را هلیوم نهاد. در مقابل قطر خورشید یعنی 700000 کیلومتر، شیدسپهر ضخامت کمی در حدود 500 کیلومتر دارد و دمای متوسط آن 6000 درجه‌ی کلوین می‌باشد [۲]. دلیل کم عمق به نظر رسیدن شیدسپهر در واقع وجود اتم هیدروژن است. دمای شیدسپهر به اندازه‌ای است که می‌تواند اتم‌ها را یونیزه کند و در نتیجه تعداد بسیاری از الکترون‌های آزاد در شیدسپهر وجود دارند. اتم‌های هیدروژن خنثی می‌توانند یک الکترون اضافی دریافت کنند و یون هیدروژن منفی،  $H^-$ ، بسازند؛ اما وابستگی این الکترون‌ها به هیدروژن بسیار سست است و تقریباً هر فوتونی انرژی کافی برای آزادسازی این الکترون دارد. در چنین فرایندی فوتون جذب می‌شود. پس می‌توان گفت که یون‌های هیدروژن منفی جاذب خوبی برای فوتون‌ها هستند و گازهای شیدسپهر را بسیار کدر می‌کنند؛ زیرا نور از این لایه به راحتی نمی‌تواند خارج شود و در نهایت ما یک سطح مشخص را که شیدسپهر نازک است می‌بینیم. دما در لایه‌های پایین شیدسپهر برابر 8000 درجه‌ی کلوین و در لایه بالایی آن به 4000 درجه‌ی کلوین افت می‌کند، بنابراین نوری که ما از خورشید می‌بینیم مخلوطی از فوتون‌های تشکیل شده توسط گازها در دماهای مختلف می‌باشد. در مورد چگالی شیدسپهر باید گفت که هر چند این لایه چگالتترین قسمت جو خورشید می‌باشد، اما چگالی کمی در حدود  $2 \times 10^{-4}$  کیلوگرم بر متر مکعب دارد. با یک تلسکوپ ساده و تعدادی فیلتر مناسب که شدت نور خورشید را بکاهد، می‌توان طرح‌های جالبی را از جمله پدیده تاریکی لبه، لکه‌های تیره، لکه‌های روشن، ساختار دانه‌ای و ابردانه‌ای بر روی سطح شیدسپهر را بر روی سطح خورشید مشاهده کرد.

---

<sup>۱۰</sup> William Ramsey



شکل ۱-۴: نمودار چگالی و دما در داخل خورشید

در زیر به معرفی هر یک از این پدیده‌ها می‌پردازیم:

۱. پدیده‌ی تاریکی لبه: وقتی در نور سفید به تصویر خورشید نگاه می‌کنیم، خواهیم دید که لبه تیزی دارد که تاریک‌تر از نواحی مرکزی آن است. به این پدیده اثر تاریکی لبه می‌گوییم<sup>۱۱</sup>. در واقع این امر ناشی از دو علت می‌باشد، اول همان‌طور که اشاره شد می‌دانیم سطوح بالاتر از شید سپهر دمای کمتری دارند و این کاهش دما می‌تواند دلیلی برای تیره به نظر رسیدن لبه‌های خورشید باشد. دوم اینکه وقتی مستقیماً به مرکز خورشید نگاه می‌کنیم می‌توانیم لایه‌های پایین‌تر شید سپهر را هم ببینیم که دمایی بالا در حدود 6000 دارند اما وقتی به نزدیکی لبه خورشید نگاه کنیم، فقط سطوح بالاتر شید سپهر را می‌بینیم که دمای پایینی دارند، به این ترتیب منطقی به نظر می‌رسد که از مرکز خورشید را درخشان‌تر از لبه‌هایش در نور مرئی ببینیم. پس در واقع شید سپهر لایه‌ای از خورشید است که حداکثر نور مرئی خورشید از این لایه می‌آید و به همین دلیل مرکز خورشید در این نور مرئی درخشان‌تر به نظر می‌رسد.

۲. لکه‌های سیاه خورشیدی: لکه‌های خورشیدی<sup>۱۲</sup> به شکل مناطقی تیره بر روی سطح خورشید ظاهر

<sup>۱۱</sup> Limb Darkening

<sup>۱۲</sup> black spots